I nuovi casi di influenza aviaria riaccendono i timori di un'altra epidemia in arrivo dall'Estremo Oriente

Contagio globale?

di Jean-Claude Manuguerra

A un anno dalla vicenda della SARS, che nella primavera del 2003 ha colpito 29 paesi, in particolare Cina, Hong Kong, Taiwan e Canada, l'annuncio di un'epidemia di influenza aviaria negli allevamenti di polli in Estremo Oriente ha riacceso il timore di una nuova pandemia. Attualmente, il virus sembra presente in una decina di paesi, fra cui Laos, Cambogia, Thailandia e Vietnam; milioni di polli sono stati sacrificati, e vi sono già state vittime umane. Si tratta di un problema relativamente circoscritto, o bisogna temere l'arrivo di un'altra «spagnola», l'influenza che nel 1918 provocò più morti del conflitto mondiale? In Germania, dove è stato segnalato un caso sospetto, ci sono state manifestazioni di panico. Ma poiché le paure irrazionali sono spesso legate all'ignoranza, è il caso di riepilogare ciò che si sa sulle epidemie di influenza, sulla natura dei virus che ne sono responsabili e sul ruolo di uccelli e suini nella diffusione del contagio. Questi animali costituiscono infatti un serbatoio e un crogiolo evolutivo da cui scaturiscono regolarmente nuovi virus potenzialmente capaci di infettare l'uomo. Quanto più uno di questi virus è «inedito» per la nostra specie, tanto maggiore è il rischio che il sistema immunitario umano non sia in grado di fronteggiarlo.

China Photos/Reuters/Corbis

Le pandemie d'influenza sono sempre state causate da virus aviari che si sono «umanizzati»

La paura istintiva di fronte a un nuovo agente patogeno deriva senza dubbio dalla memoria collettiva delle numerose epidemie verificatesi nel corso della storia. Circa 2400 anni fa, Ippocrate descrisse un'epidemia di tosse e polmonite scatenatasi nella Grecia settentrionale. Non sappiamo se in quel caso si trattasse davvero di influenza, ma le epidemie di febbri acute che sono state descritte nel corso degli ultimi cinque secoli erano invece certamente di natura influenzale. Secondo le fonti, vi sarebbero state pandemie influenzali negli anni 1510, 1557, 1729-1733, 1781-1782, 1829-1833, 1889-1890 e 1900. Una delle più gravi sembra essere stata quella del 1781-1782, che avrebbe colpito i due terzi della popolazione di Roma e gran parte dell'Inghilterra, arrivando a propagarsi fino all'America settentrionale e meridionale. Ma la più mortale di tutti i tempi fu la cosiddetta «Spagnola», che infuriò nel 1918-1919. Secondo le stime, causò fra 20 e 50 milioni di morti, e pare che abbia infettato circa metà della popolazione mondiale. In Francia i primi casi vennero osservati nell'aprile 1918 fra le forze armate di stanza in Normandia. L'influenza si diffuse poi in tutta Europa, propagandosi verso gli Stati Uniti e l'India. La prima ondata terminò nell'agosto 1918, ma una seconda ebbe inizio quasi subito, in settembre, e imperversò fino alla fine di ottobre, con l'eccezione dell'Australia, dove la Spagnola continuò a fare vittime fino al gennaio 1919.

La pandemia suscitò l'interesse dei microbiologi, e già all'indomani della prima guerra mondiale René Dujarric de la Rivière dimostrò, all'Istituto Pasteur di Parigi, che l'agente infettivo era un «virus filtrante». Nel 1931, il virologo americano Richard Shope, osservando la concomitanza della Spagnola nell'uomo e di una malattia simile nei suini nello stesso periodo, isolò nel maiale il primo patogeno denominato virus influenzale. Solo due anni più tardi, nel 1933, in seguito a un'epidemia di influenza in Gran Bretagna, tre ricercatori londinesi identificarono per la prima volta un virus influenzale umano. Ne vennero poi individuati altri due tipi: il virus B, nel 1940, e il C, nel 1947.

Nel 1957 comparve un nuovo virus influenzale di tipo A, responsabile della pandemia nota come «Asiatica», che si differenziava dai precedenti per la natura dei suoi antigeni di superficie. La pandemia venne segnalata inizialmente nella Cina meridionale nel febbraio 1957, ma è possibile che il virus fosse apparso già nell'anno precedente. L'asiatica si diffuse poi nella provincia dello Yunnan, e nell'aprile 1957 arrivò a Hong Kong, a Singapore, in Giappone e nel resto dell'Estremo Oriente. Il Medio Oriente venne colpito in luglio, e poco dopo l'epidemia raggiunse l'Africa. Il nuovo virus forse arrivò in Europa nell'estate 1957, ma l'influenza iniziò solamente in autunno. Tuttavia, sebbene il numero di persone infettate nel corso di questa pandemia sia stato considerevole, la mortalità fu molto inferiore a quella registrata in occasioni precedenti.

Funzioni alterate

Oggi nella specie umana circolano due sottotipi del virus influenzale A – i sottotipi A(H1N1) e A(H3N2) e, dalla stagione 2001-2002, il risultato del loro «riassortimento» A(H1N2) – nonché i virus dei tipi B e C. Che cosa li differenzia e perché alcuni sono più pericolosi di altri? Essi appartengono tutti alla famiglia Orthomyxoviridae. Il loro genoma è costituito da un RNA a filamento singolo ed è segmentato: i virus A e B sono formati da otto segmenti di RNA, mentre il virus C ne possiede solo sette. La superficie delle particelle virali è irta di «punte» o spicole. I virus A e B presentano due tipi di proteine di superficie: l'emoagglutinina e la neuramminidasi, la cui forma rigonfia all'estremità conferisce alle spicole un aspetto da fungo. Queste due proteine costituiscono gli antigeni esterni dei virus influenzali. Nei virus di tipo C vi è un solo tipo di spicola che unisce le funzioni svolte dall'emoagglutinina e dalla neuramminidasi negli altri virus influenzali.

L'emoagglutinina è la più abbondante fra le glicoproteine di superficie. Su ogni particella virale vi sono da 350 a 500 spicole, ciascuna formata da tre molecole identiche legate fra loro. Esposta sulla superficie della cellula infettata, l'emoagglutinina comprende tre parti: una parte extracellulare, un dominio transmembrana idrofobo che serve per l'ancoraggio al doppio strato lipidico, e una coda citoplasmatica intracellulare. Ogni variazione della molecola può modificarne l'affinità per il recettore o la specificità di ancoraggio. L'emoagglutinina ha un ruolo fondamentale nella fusione dell'involucro virale con la cellula bersaglio: da essa dipende la penetrazione del virus nella cellula e, di conseguenza, la sua capacità di contagio. Nel caso del virus influenzale C, l'emoagglutinina è coinvolta nella diffusione delle particelle virali. Infine, questa molecola è il bersaglio principale degli anticorpi che il sistema immunitario conserva «in memoria» dopo essere venuto a contatto con un agente infettivo, e che bloccano un'infezione causata da un patogeno già incontrato.

La neuramminidasi è un'altra proteina di superficie dei virus influenzali di tipo A e B. Occorrono quattro molecole identiche legate fra loro per formare una spicola. Sulla superficie delle particelle virali è presente una quantità di neuramminidasi circa cinque volte inferiore a quella di emoagglutinina. La neuramminidasi ha un'attività enzimatica, e il suo ruolo è essenziale per la propagazione di questi virus.

IN SINTESI

- Nella specie umana circolano attualmente vari sottotipi dei virus influenzali A, B e C le cui capacità di contagio dipendono dalle proteine degli antigeni di superficie con cui il virus si àncora alle cellule dell'ospite per poi penetrare al loro interno.
- La capacità di questi virus di mutare rapidamente e di passare anche da una specie all'altra ne aumenta la pericolosità poiché l'organismo infettato non è in grado di usare gli anticorpi prodotti in occasioni precedenti per difendersi.
- Gli uccelli costituiscono un immenso serbatoio di virus influenzali di tipo A che possono essere trasmessi al maiale e da questo, in alcuni casi, all'uomo.
- A provocare pandemie come la Spagnola o l'Asiatica sono i virus ibridi, derivanti da una ricombinazione di segmenti virali di specie diverse.

La prima fase del ciclo virale è l'ancoraggio del virus alla superficie della cellula ospite, tramite recettori specifici dei virus influenzali. Una volta ancorata, la particella virale si introduce nella cellula per endocitosi. Le proteine virali esterne, e in particolare l'emoagglutinina, sono resistenti alla maggior parte degli enzimi di degradazione (le proteasi) sintetizzati dalla cellula ospite. Quando il virus è penetrato nella cellula, prende il controllo dei meccanismi cellulari a proprio vantaggio, costringendoli a produrre i componenti delle proteine che costituiranno le nuove particelle virali. Questi virioni neosintetizzati fuoriescono per gemmazione dalla superficie della cellula distruggendola e vanno a infettare nuove cellule dove si replicheranno. Ogni anno, i virus influenzali che circolano nell'uomo danno origine a epidemie più o meno intense, in particolare quando appare un sottotipo nuovo per l'uomo. Questi virus non si trasmettono unicamente da un essere umano all'altro, ma passano, come abbiamo detto, attraverso altre specie animali; e questo passaggio può causare un'improvvisa variabilità del virus.

Il maggior numero di sottotipi del virus A si osserva negli uccelli selvatici, in particolare anatre e oche migratrici. Mentre nell'uomo hanno circolato solo virus che presentano alla superficie le emoagglutinine H1, H2 e H3, negli uccelli sono presenti virus dotati delle emoagglutinine da H1 a H15. Quattordici di questi 15 tipi molecolari sono stati isolati nelle anatre selvatiche. Allo stesso modo, le neuramminidasi dei virus umani appartengono solo ai tipi N1 e N2, mentre quelle dei virus aviari sono dei tipi da N1 a N9. Perciò gli uccelli costituiscono un immenso serbatoio di virus influenzali A.

Greg Baker/AP Photo

Anat Givon/AP Photo

IL BLOCCO DELLE IMPORTAZIONI DI POLLAME dai paesi colpiti dall'influenza aviaria è stato una delle prime misure per contenere la diffusione del virus. Sopra, mercato di pollame a Shanghai. A fianco, la prima spedizione di polli arrivata a Hong Kong dalla Cina dopo la fine del blocco di febbraio.

Il ruolo dei suini

I virus influenzali sono stati isolati negli uccelli sia in Asia sia in Oceania, Europa e America Settentrionale. Le specie interessate appartengono a vari ordini: anatre e oche, polli, tacchini e quaglie, cormorani, albatros, pulcinella di mare e procellarie, alcune delle quali migrano spostandosi da un emisfero all'altro. Dopo aver nidificato nella zona d'origine, queste specie iniziano il loro viaggio, e durante le soste incontrano altre specie migratrici che si concentrano nella stessa zona.

All'inizio di una migrazione, una percentuale considerevole degli stormi è formata da esemplari giovani, che compiono il viaggio per la prima volta e che non sono ancora entrati in contatto con molti agenti patogeni. Poiché le loro difese immunitarie sono meno efficaci di quelle dei genitori, essi sono particolarmente sensibili al contagio dei virus influenzali, favorito dalla promiscuità fra individui di una stessa specie provenienti da paesi diversi o fra individui di specie diverse. Gli uccelli si raccolgono spesso in prossimità di sorgenti di acqua dolce o salmastra, dove abbondano i virus eliminati con gli escrementi dagli esemplari infettati. Le zone di sosta favorisco-

no anche gli incontri fra i migratori e gli stanziali della stessa specie. Oltre a riunire diverse specie di uccelli, le migrazioni le portano a interagire con animali stanziali, selvatici o domestici. I volatili domestici sono l'anello intermedio fra gli uccelli acquatici selvatici migratori e altri animali domestici, in particolare i maiali che possono essere infettati dai virus aviari. È noto che nei suini circolano virus A(H1N1) e A(H3N2). Il maiale può quindi svolgere il ruolo di incubatore evolutivo e di anello di trasmissione interspecifica; inoltre costituisce un «serbatoio» di virus umani. Così, i virus aviari si trasmettono fra le diverse specie di uccelli, e i virus umani e aviari subiscono ricombinazioni genetiche nel maiale.

Quanto all'uomo, fino al 1997 si è ritenuto che la contaminazione da parte dei virus dell'influenza aviaria fosse impossibile. In quell'anno si è avuto l'episodio dell'influenza dei polli a Hong Kong, che ha causato alcune vittime senza però dare origine a una pandemia; oggi assistiamo a un nuovo caso analogo. Tuttavia si ritiene ancora che la contaminazione diretta sia rara. L'opinione più accreditata è che, anche se l'uomo può essere infettato dai volatili, il virus non sia abbastanza adattato alla specie umana da potersi moltiplicare e diffondere fino al punto di generare una pandemia. I suini sono comunque un anello importante (per non dire indispensabile) nella catena di eventi che conducono alla comparsa di nuovi virus adattati all'uomo. I virologi hanno stabilito che è stato attraverso i maiali che, intorno al 1968, è apparso in Asia il sottotipo A(H3N2), per sostituzione, in particolare, della molecola di emoagglutinina H2 del virus umano A(H2N2) con una di tipo H3 derivata da un virus che infetta le anatre selvatiche. I meccanismi di trasmissione dei virus influenzali hanno dunque una caratteristica essenziale: mettono in scena parecchi attori. L'uomo, talvolta il maiale, e gli uccelli.

La comparsa di nuovi virus

Sia che si presentino in popolazioni aviarie o nei suini, le nuove forme virali appaiono in seguito a modificazioni genetiche. Come molti virus a RNA, anche quelli influenzali mutano secondo due meccanismi: la deriva antigenica, dovuta a mutazioni puntiformi, e la sostituzione antigenica, causata per lo più da una ricombinazione. L'RNA polimerasi è un enzima che agisce in modo impreciso: commette un gran numero di errori quando copia l'RNA e non li corregge, così gli errori si conservano. Le mutazioni possono essere silenti, nel senso che non comportano modifiche degli amminoacidi codificati. A volte possono generare cambiamenti nella sequenza proteica: in questo caso sono dannose per il virus in quanto fanno perdere struttura o funzione a un sito vitale. Altre volte, però, rappresentano un vantaggio perché modificano un antigene virale; l'ospite quindi non riconosce o riconosce a stento questo antigene e impiega più tempo a ripristinare le proprie difese. Il nuovo agente patogeno ne approfitta per moltiplicarsi, e l'esito della lotta dipende dalla prontezza relativa dei due antagonisti. Quando una mutazione altera un sito antigenico, si parla di deriva antigenica. Il tasso di mutazione dei geni che codificano per l'emoagglutinina è circa 1000 volte superiore al tasso medio che si ha nel corso, per esempio, della sintesi normale delle cellule dei mammiferi. Questo meccanismo spiega come, da un anno all'altro, la sequenza dei geni che codificano per l'emoagglutinina del virus influenzale umano di tipo A vari dell'uno per cento circa. Con l'accumularsi delle mutazioni, nell'uomo compaiono nuovi ceppi di virus A. È per questo che la composizione del vaccino antinfluenzale va rivista ogni anno.

L'altro meccanismo di variazione corrisponde alla sostituzione completa di una molecola di superficie, per esempio di una emoagglutinina. Il fenomeno è reso possibile dal fatto che il genoma dei virus influenzali è segmentato. I virus aviari, anche se sono capaci di infettare le cellule umane, sovente si replicano a fatica nel nuovo ospite e si trasmettono con difficoltà da un individuo all'altro. In realtà, perché un virus aviario scateni un'epidemia, non basta che esponga antigeni sconosciuti alla specie umana; deve anche avere una buona capacità di replicarsi nel nuovo ospite. Queste due proprietà sono appannaggio dei virus ibridi, derivanti da una ricombinazione fra virus umano e aviario. In occasione, per esempio, di una co-infezione di un maiale da parte di un virus umano e di uno aviario, dato che i segmenti di RNA del genoma virale sono indipendenti, nel momento in cui si genera una nuova particella virale può formarsi un ibrido in cui gli RNA sono male indirizzati e mescolati. Sembra però che non tutte le otto combinazioni dei segmenti siano possibili.

SUBITO DOPO LA FINE DEL PRIMO CONFLITTO MONDIALE, l'epidemia di Spagnola causò tra i 20 e i 50 milioni di morti. Nella foto, ammalati in un ospedale di emergenza a Camp Funston, in Kansas, nel 1918.

Il virus ibrido, o ricombinante, può derivare i geni «di adattamento» dal virus umano e i geni che codificano per l'emoagglutinina e per la neuramminidasi da quello aviario. In questo caso, vi è una sostituzione completa di queste due molecole di superficie. Il virus ricombinante è «umano dentro e aviario fuori»: conserva la capacità di replicarsi nell'uomo e non incontra difese immunitarie specifiche perché nelle popolazioni umane non vi sono anticorpi preesistenti diretti contro le emoagglutinine e le neuramminidasi aviarie. Si tratta allora di un virus nuovo per l'uomo, capace di provocare una pandemia. Gli eventi di ricombinazione genomica nei virus influenzali si producono nei suini

I SUINI AVREBBERO SVOLTO UN RUOLO IMPORTANTE nelle pandemie influenzali del 1957 e del 1968. Probabilmente, un virus influenzale umano era presente nei suini insieme con uno derivante dalle anatre selvatiche. La ricombinazione dei due avrebbe dato origine a un nuovo virus contenente tre segmenti di RNA aviario e cinque di quello umano. Fra gli aviari figuravano quelli codificanti per l'emoagglutinina e la neuramminidasi, cosicché il nuovo virus A(H2N2) poteva contagiare l'uomo, che non aveva difese contro gli antigeni di anatra. Questo virus provocò la pandemia del 1957. In seguito esso entrò in contatto, sempre in un suino, con un altro virus aviario, originando un nuovo virus ibrido in cui cinque segmenti erano umani, uno derivava dalla prima ricombinazione e due dalla seconda. Il nuovo virus, A(H3N2), fu responsabile della pandemia influenzale di Hong Kong.

e anche in diverse specie di uccelli. La gamma di geni capaci di trasmettersi da una specie all'altra, e infine all'uomo, è ampia.

Quando un virus influenzale colonizza un nuovo ospite, in che modo può evolversi per diventare un parassita ben adattato a questo nuovo ambiente biologico? Si è constatato che i virus umani del tipo A evolvono rapidamente, al contrario di quelli aviari. Nell'uomo, la pressione selettiva esercitata dal sistema immunitario è elevata, e le proteine di superficie dei virus influenzali si modificano a grande velocità. I virus influenzali umani di tipo A potrebbero essere specie effimere costrette a evolvere rapidamente per poter reinfettare la popolazione umana eludendo le difese immunitarie dell'ospite. Questa rapidità di evoluzione riflette senza dubbio una situazione di non equilibrio fra l'ospite e il suo parassita virale.

Rispetto a questo quadro di cambiamenti rapidi e cumulativi dei virus umani, i geni dei virus aviari sono invece meno variabili. Le alterazioni sono sporadiche e non si accumulano. Questa stagnazione evolutiva rispecchia senza dubbio un adattamento ottimale fra ospite aviario e parassita virale, frutto di un equilibrio antico. Così, in un dato momento, la diversità genetica dei virus influenzali umani di tipo A è scarsa, in quanto è limitata dalla circolazione fugace di varianti successive di breve vita (a causa della forte pressione selettiva). È per questo motivo che, in ogni dato momento, nell'uomo circola solo un numero molto limitato di varianti dei due sottotipi del virus influenzale A. Al contrario, negli uccelli circolano simultaneamente numerosi sottotipi e varianti.

Quando compare un virus di un sottotipo nuovo, per superare il processo selettivo esso deve adattarsi al nuovo ospite e trasmettersi. Questo adattamento del nuovo ibrido richiede numerosi cicli virali e, di conseguenza, numerosi passaggi da individuo a individuo. Il radicamento di un nuovo virus nell'uomo necessita quindi di contatti frequenti fra persone suscettibili di infezione e persone infettate, e questo è esattamente ciò che accade nei luoghi con elevata densità di popolazione, come la Cina sudorientale. Quando poi il nuovo virus si è insediato nell'uomo in una data regione geografica, si può diffondere facilmente: gli individui contagiati possono trasportare un nuovo agente influenzale in poche ore grazie ai viaggi aerei, proprio come i virus aviari sono trasportati dagli uccelli migratori.

Autopsia del virus di Hong Kong

Basta però che sia assente uno dei fattori – l'adattamento all'ospite, l'efficienza della trasmissione, la novità di qualche antigene – perché l'introduzione di un nuovo virus in una specie non conduca a un radicamento durevole. Esistono parecchi esempi di questi insuccessi evolutivi. Nel 1993, nei Paesi Bassi, due bambini furono infettati da virus suini derivanti dalla ricombinazione di virus umani e di virus aviari, ma non vi fu alcuna epidemia, probabilmente perché gli antigeni di superficie appartenevano a tipi molecolari già circolanti nell'uomo, e i geni di origine aviaria erano male adattati alla nostra specie.

L'episodio di influenza dei polli verificatosi nel 1997 a Hong Kong non ha dato origine alla temuta pandemia perché i virus A(H5N1) trasmessi all'uomo erano puramente aviari e poco adat-

L'ALBERO FILOGENETICO DI UN VIRUS INFLUENZALE è spesso difficile da stabilire, perché alla sua «costruzione» possono aver partecipato parecchi elementi. I virologi hanno quasi ricostruito la catena di ricombinazioni che portò alla comparsa del virus A(H5N1) dell'influenza di Hong Kong del 1997. Il «fondo genetico», vale a dire un complesso di sei segmenti invarianti, passò senza modifiche dalla quaglia al pollo e poi all'uomo. Strada facendo, il virus subì ricombinazioni, incorporando segmenti di virus derivati da due uccelli acquatici che verosimilmente si sono ricombinati non in un maiale, ma in un ospite aviario sconosciuto. Il virus A(H5N1), che non doveva essere eccessivamente patogeno per il pollo – altrimenti i portatori sarebbero tutti morti – si trasmise non modificato all'uomo. Questo virus conteneva il fondo genetico di un virus H9N2, un gene H5 di un virus di uccello acquatico e un gene N1 di un virus di un altro volatile.

Virus H9N2 di quaglia
Virus H6N5 di uccello acquatico
Fondo genetico conservato fino al virus umano H5N1 di Hong Kong
H6
Segmento H6
Ospite aviario?
H5
H6
N1
?
Segmento H5
Segmento N1
Virus H5N1 di pollo Virus di Hong Kong
H5
N1
Virus H6N1 di anatra
Virus H5N1 di Hong Kong infettivo per l'uomo
H5
N1

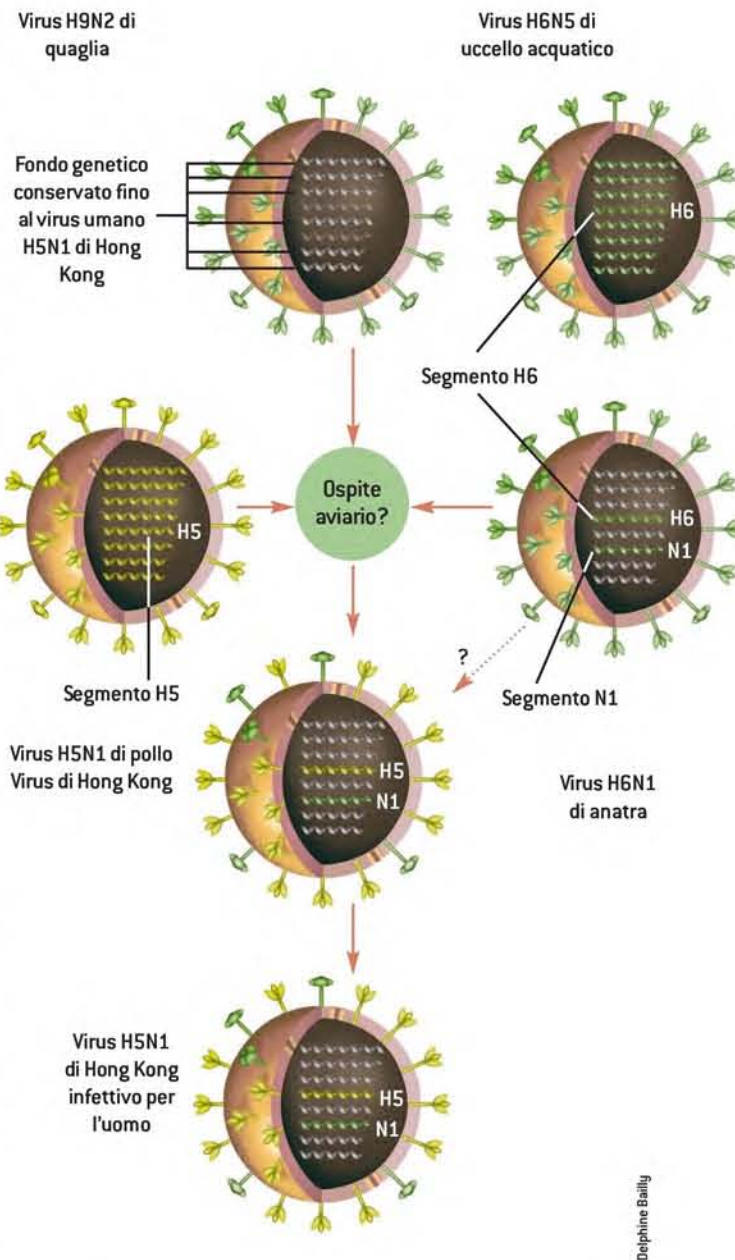
Delphine Bailly

tati alla nostra specie. Solo i volatili vivi erano in grado di infettare gli esseri umani, fra i quali non vi era trasmissione del contagio. I virus A(H5N1) non sono riusciti a radicarsi nell'uomo e la soppressione della fonte di contaminazione ha sventato il pericolo. Al di là dell'infezione di volatili domestici da parte di uccelli selvatici e al di là dei fattori demografici, questo esempio sottolinea la rilevanza dei comportamenti socioculturali nella trasmissione di un virus sconosciuto da una specie animale all'uomo: solo i volatili vivi sono una fonte di infezione, e a Hong Kong il pollame viene appunto venduto vivo nei mercati ed entra direttamente a contatto con la popolazione. È stata la concomitanza di queste due condizioni a favorire la trasmissione interspecifica, dai volatili all'uomo.

Virus del terzo tipo

Nel 1968, il virus oggi denominato con la sigla A(H2N2) fu soppiantato da un terzo virus influenzale A, derivante da una ricombinazione genetica che portò, in particolare, alla sostituzione dell'emoagglutinina del virus A(H2N2) con una proveniente da un virus aviario, dando origine al sottotipo A(H3N2). Questo evento fu la causa dell'ultima pandemia registrata, l'influenza di Hong Kong, o cinese: nel luglio 1968 si osservò un'esplosione di sindromi influenzali dovute a un virus molto simile ad A(H2N2). Questo episodio era stato preceduto da un'epidemia dello stesso tipo nella Cina sudorientale. Hong Kong fu colpita nel luglio 1968, poi fu la volta di Singapore, delle Filippine, di Taiwan, del Vietnam, della Malaysia e infine, a settembre dello stesso anno, di Thailandia, India e Australia settentrionale.

Poi l'epidemia ebbe una pausa, salvo che negli Stati Uniti, dove iniziò a colpire in ottobre. Questo primo episodio si estinse nell'aprile 1969, e in Europa la «stagione dell'influenza» 1968-1969 fu quasi normale. I paesi tropicali, come Brasile, Kenya, Indonesia, furono raggiunti fra la fine del 1968 e l'inizio del 1969. Le nazioni dell'emisfero australe furono colpite da epidemie moderate fra marzo e maggio del 1969. Viceversa, l'epidemia di influenza che fino a quel momento aveva risparmiato l'Europa occidentale fu più grave e culminò nel dicembre 1969, prima di estinguersi completamente nel marzo successivo.

La biologia molecolare ha anche fornito alcuni indizi sull'identità del virus della spagnola. Sono stati analizzati frammenti di materiale genetico (RNA) del virus che aveva infettato tre vittime (due soldati di cui erano stati preservati frammenti di tessuto polmonare e una Inuit sepolta nel suolo ghiacciato dell'Alaska ed esumata nel 1997). Il gruppo di Jeffrey Taubenberger, dell'Armed Forces Institute of Pathology di Washington, ha dimostrato che il virus della spagnola era senza dubbio un rappresentante del sottotipo A(H1N1). Oggi di questo agente patogeno sono note l'intera sequenza dell'emoagglutinina e della neuramminidasi. L'analisi di queste sequenze dimostra che il virus aviario responsabile della spagnola venne introdotto alcuni anni prima dell'inizio della pandemia in un mammifero, dove si sarebbe evoluto trasformandosi definitivamente in virus dei mammiferi.

Quale lezione si può trarre da queste informazioni? La caratterizzazione del genoma virale responsabile delle morti in Estremo Oriente è in corso. Si sa che è un virus aviario A(H5N1), ma non si può ancora prevedere quale sarebbe la sua virulenza in caso di epidemia, né fino a che punto sarebbe adattato all'uomo. Il rischio principale è rappresentato dalla comparsa di un nuovo virus in una persona contagiata simultaneamente da un virus influenzale «classico» e da questo virus aviario.

La minaccia della ricombinazione

Se avvenisse una ricombinazione fra questi due virus, il patogeno risultante potrebbe conservare il carattere «umanizzato» del virus classico, che gli permetterebbe di moltiplicarsi nell'uomo, e nel contempo acquisire un gene per una proteina del capside del virus aviario. Al primo contatto, il sistema immunitario non disporrebbe dunque di alcun anticorpo contro questo virus, mai incontrato, e prima che le difese immunitarie possano organizzarsi

Suzanne Plunkett/AP Photo

Linda Kahlbaugh/AP Photo

LE ZONE DI SOSTA degli uccelli migratori, spesso vicine a pozze d'acqua dove abbondano i virus eliminati con gli escrementi dagli esemplari infetti, sono un luogo di incontro tra specie migratrici e stanziali diverse. In alto: nel villaggio di Bolangan, a Bali, 2500 polli sono stati arsi vivi per allontanare gli spiriti maligni ritenuti responsabili dell'epidemia.

(di solito occorre qualche giorno), l'invasore avrebbe il tempo di moltiplicarsi enormemente. Il sistema immunitario, soverchiato, sarebbe impotente. Se il nuovo virus si adattasse bene all'uomo, si trasmetterebbe facilmente, soprattutto dove vi è un'elevata densità di popolazione, scatenando un'epidemia.

Al momento, questo virus aviario non è necessariamente più pericoloso di un altro, anche se provoca infezioni a cui si associa una mortalità particolarmente elevata. Il suo futuro dipende invece dalla casualità delle ricombinazioni genetiche, che potrebbero fargli acquisire simultaneamente la capacità di eludere il sistema immunitario umano e quella di trasmettersi con efficienza dall'ammalato al sano, come accadde per il virus della Spagnola. Se i virus influenzali hanno rivelato molti dei loro segreti, i meccanismi della trasmissione da una specie a un'altra non sono ancora del tutto chiariti. Non si riesce, per esempio, a prevedere se un certo tipo di emoagglutinina aviaria un giorno farà parte dei componenti di un virus adattato all'uomo. È questa la domanda che suscitano le nuove epidemie, e in particolare quella che si sta manifestando ora in Estremo Oriente.

L'AUTORE

JEAN-CLAUDE MANUGUERRA è stato condirettore del Centro nazionale francese di riferimento per l'influenza e del Centro che collabora con l'OMS per la ricerca sui virus influenzali e gli altri virus respiratori dal 1994 al 2004. Attualmente dirige il Centro di intervento biologico d'urgenza dell'Istituto Pasteur di Parigi.

PER APPROFONDIRE

TAUBENBERGER J. e altri, *Initial Genetic Characterization of the 1918 Spanish Influenza Virus*, in «Science», 275, 5307, pp. 1793-1796, 1997.

AUTORI VARI, *Données sur la grippe à virus A(H5N1) à Hong Kong et sur le début de l'épidémie de grippe à virus A(H3N2) en France*, in «Bulletin épidémiologique hebdomadaire», 8, p. 31, 1998.

MANUGUERRA J.-C., *Écologie, biodiversité et évolution des virus grippaux*, in «Virologie», 5, n. 3, pp. 195-205, 2001.

Caccia al vaccino

La ricerca di nuovi metodi per la produzione dei vaccini è un'arma fondamentale per garantire l'immunizzazione di massa in caso di epidemie globali di influenza

di Edoardo Altomare

Non si è limitato a far strage di polli in mercati e allevamenti asiatici e americani. Ha ucciso anche una ventina di esseri umani tra Vietnam e Thailandia: così, in pochi mesi, il virus influenzale aviario A/H5N1 è diventato uno spauracchio globale. Assai più del coronavirus della SARS, che pure l'anno scorso di questi tempi ancora imperversava nel Sud-est asiatico e a Toronto. Se è vero infatti che al momento non sono documentati casi di trasmissione interumana del virus, quest'evenienza è fortemente temuta da virologi ed epidemiologi, dato che potrebbe preludere a una nuova pandemia. Il fatto è che fino al 1997 nessun virus influenzale H5 aveva infettato esseri umani, né si era mai verificato il passaggio di un virus aviario all'uomo senza un ospite intermedio, come, per esempio, il maiale.

George B. Diebold/Corbis/Contrasto

Belinsky Yuri/ITAR-TASS/Corbis

«Oggi le possibilità di produrre dosi sufficienti **di vaccino contro l'H5N1 sono limitate»**

Russell Kightley / SPL/Grazia Neri

UNA RICERCATRICE AL LAVORO in uno dei laboratori russi impegnati, in collaborazione con la Cina, nello sviluppo e nella produzione di vaccini contro la SARS e i virus influenzali. A destra, interpretazione artistica digitale di come due sottotipi di virus influenzali (*genoma colorato in viola e in arancio*), infettando contemporaneamente una cellula ospite (*in basso a destra*) possono combinarsi in modo da formare un nuovo sottotipo virale (*genoma viola e arancio, a sinistra*).

L'AUTORE

EDOARDO ALTOMARE è medico e giornalista scientifico. Tra i suoi libri: *Medicine e miracoli* (1998), *Influenza* (2000) e *Virus all'attacco* (2003), tutti per Avverbi Edizioni.

A parte le diciotto persone contagiate nel dicembre di sette anni fa a Hong Kong, sei delle quali decedute, l'intera popolazione umana è dunque oggi *naïve* – vale a dire assolutamente impreparata – nei confronti di un virus, come appunto l'H5, che non ha mai circolato in precedenza: in altre parole, la gravità della sindrome influenzale da esso provocata non potrebbe essere attenuata da un'immunità preesistente.

Dalla combinazione del nuovo ceppo H5N1 – che appare peraltro mutato rispetto a quello comparso a Hong Kong nel 1997 – con un ceppo influenzale umano potrebbe infatti avere origine un nuovo sottotipo virale capace di innescare un'epidemia globale. Se ciò accadesse, una vaccinazione di massa sarebbe fondamentale per qualsiasi programma di contenimento. Lo affermano, tra gli altri, Wendy Barclay e Maria Zambon in un commento apparso a fine gennaio sul «British Medical Journal»: avvertendo però che, nonostante da più di quarant'anni si somministrino vaccini inattivati contro l'influenza, la nostra esperienza nei confronti di sottotipi virali assolutamente inediti è limitata. Così come è limitata la disponibilità di uova embrionate di pollo nelle quali far crescere i ceppi virali: «I vaccini antinfluenzali tradizionali – ricorda Rino Rappuoli, responsabile della ricerca globale alla Chiron di Siena – sono costituiti da virus "riassortanti" (in pratica si tratta di un compromesso tra un virus che si sviluppa bene nell'uovo e quello contro il quale si vuole vaccinare) con cui vengono co-infettate le cellule di pollo». I virus riassortanti sono mescolati artificialmente in laboratorio in modo da contenere le proteine H e N del ceppo infettante. Un metodo, questo, che ha funzionato bene negli ultimi 20-30 anni, anche se con qualche incidente di percorso: come il vaccino preparato per l'inverno appena trascorso, che in realtà non era ottimale in quanto non protettivo nei confronti del ceppo Fujian.

I limiti evidenti della metodica tradizionale per la produzione di vaccini impongono l'individuazione di percorsi alternativi che riescano ad affrancarci dalla schiavitù delle uova. «Sono in corso – annuncia Rappuoli – progetti di rilievo. C'è per esempio la possibilità di preparare vaccini antinfluenzali non più dalle uova ma da colture cellulari. Si usano per questo dei fermentatori – detti "bioreattori" – nei quali vengono fatte crescere cellule di mammifero, di derivazione umana o da primati, poi infettate da un virus: e il vaccino si ricava dal sovranatante dopo che le cellule sono state lisate dal virus».

È già possibile produrre questo vaccino: «È sicuro ed è immunogenico – sostiene Rappuoli – e stiamo iniziando la fase III della sperimentazione. Tale fase deve essere portata avanti su volontari per due stagioni consecutive, in modo che le autorità regolatorie, prima di concedere la loro autorizzazione, possano verificare che il prodotto funzioni nel tempo». Secondo l'esperto della Chiron, che è una delle cinque maggiori aziende mondiali nel settore, il vaccino derivato da colture cellulari potrà essere in commercio solo tra tre o quattro anni, e non rimpiazzerà subito e completamente quello tradizionale: «Per questo – prevede Rappuoli – occorreranno circa 10 anni dall'immissione in commercio». Il tutto, dunque, potrebbe richiedere quasi 15 anni da oggi. Decisamente troppi, nel caso si rendesse necessario un vaccino per contrastare la diffusione di un nuovo virus pandemico.

Per fortuna abbiamo altre strategie, che consentirebbero un notevole accorciamento dei tempi d'attesa. Una delle più promettenti è quella messa a punto da un giovane ricercatore italiano presso l'Istituto di medicina molecolare dell'Università di Pittsburgh. Si chiama Andrea Gambotto, ha 36 anni e dopo la laurea in medicina e un tirocinio in un laboratorio di genetica dell'ateneo di Bari, vive e lavora da ormai nove anni negli States: «Mi sono sempre occupato – racconta – di immunologia, di vaccini e di vettori virali (cioè di virus che servono a introdurre nelle cellule frammenti di materiale genetico) per la terapia genica dei tumori». Ed è proprio utilizzando i fondi di un programma di terapia genica del National Heart Lung and Blood Institute che Gambotto ha ideato una metodica per produrre vaccini nei confronti di qualsiasi sequenza genomica conosciuta. Una tecnica che è stata subito applicata per la preparazione di un vaccino contro il coronavirus associato alla SARS (SARS-CoV), come Gambotto ha illustrato in un lavoro scientifico apparso nel dicembre scorso su «Lancet»: «Abbiamo generato – riassume – un vettore costituito da un adenovirus (un virus solitamente impiegato nei protocolli di terapia genica in quanto non tossico e ben tollerato) combinato con proteine del SARS-CoV. Inoculato nei macachi, questo virus-chimera ha suscitato una risposta specifica da parte delle cellule T insieme con la produzione di anticorpi neutralizzanti contro il SARS-CoV».

Poiché, tuttavia, il virus in questione non si replica bene nei macachi, le scimmie non si ammalano di SARS, ed è dunque impossibile valutare appieno l'effetto protettivo del vaccino: «Ecco perché – aggiunge Gambotto – ora c'è bisogno di sperimentarlo nel furetto per poi, nel giro di sei-otto mesi, passare all'uomo».

A partire dal dicembre 2003 lo scenario epidemiologico è però completamente mutato: e il timido ritorno della SARS è stato oscurato dalla minaccia incombente di una nuova pandemia influenzale. Sull'eventualità che si renda necessaria una vaccinazione di massa, Gambotto concorda, ma avverte: «Le attuali possibilità di produrre dosi sufficienti di vaccino contro l'H5N1 sono limitate. Ci sono solo nove case farmaceutiche in tutto il mondo capaci di prepararne grandi quantità, ma possono coprire al massimo il 5-10 per cento del fabbisogno mondiale». Il fattore limitante, al solito, è rappresentato dalla disponibilità di uova; ma i vaccini contro i virus H5, peraltro, non possono essere fabbricati col metodo standard, dato che sono rapidamente letali per gli embrioni di pollo. Ciò giustifica il grosso impegno nel cercare sistemi di produzione alternativi.

Ma è inutile, secondo Gambotto, preparare un vaccino prima del tempo: «Il virus dell'influenza – sottolinea – è un *moving target*, un bersaglio mobile. E, se ci fosse una pandemia, nel corso della sua evoluzione l'H5N1 potrebbe mutare. Solo nel caso malaugurato che la pandemia parta con un numero ragionevolmente elevato di casi, la produzione del vaccino potrà iniziare». In quel caso, la metodica messa a punto da Gambotto nel suo laboratorio di Pittsburgh sarebbe quanto mai utile: «Una volta ottenuta la sequenza genetica virale, usando la tecnologia ricombinante e gli adenovirus e forzando al massimo i tempi, potremmo generare in soli venti giorni una riserva iniziale – il cosiddetto *seed-stock* – da cui è possibile produrre grandi quantità di vaccino».

«Il virus chimerizzato messo a punto dall'équipe di Gambotto – riconosce Rappuoli – è un buon candidato, soprattutto in caso di emergenza. Ma sono prevedibili incertezze e tempi lunghi per la registrazione: con i vaccini a virus vivi, infatti, occorre prudenza. Meglio quelli a virus uccisi: abbiamo già la tecnologia e sappiamo come farli». Cautela viene espressa anche da Barclay e Zambon: «Gli ostacoli da superare per un vaccino contro i virus H5, di natura regolatoria oltre che tecnologica, non vanno sottovalutati». Ma se il mondo si trovasse di fronte alla temuta emergenza pandemica influenzale, lascia intendere Gambotto, alcuni dei passaggi previsti dalle autorità regolatorie dovrebbero di necessità essere trascurati.

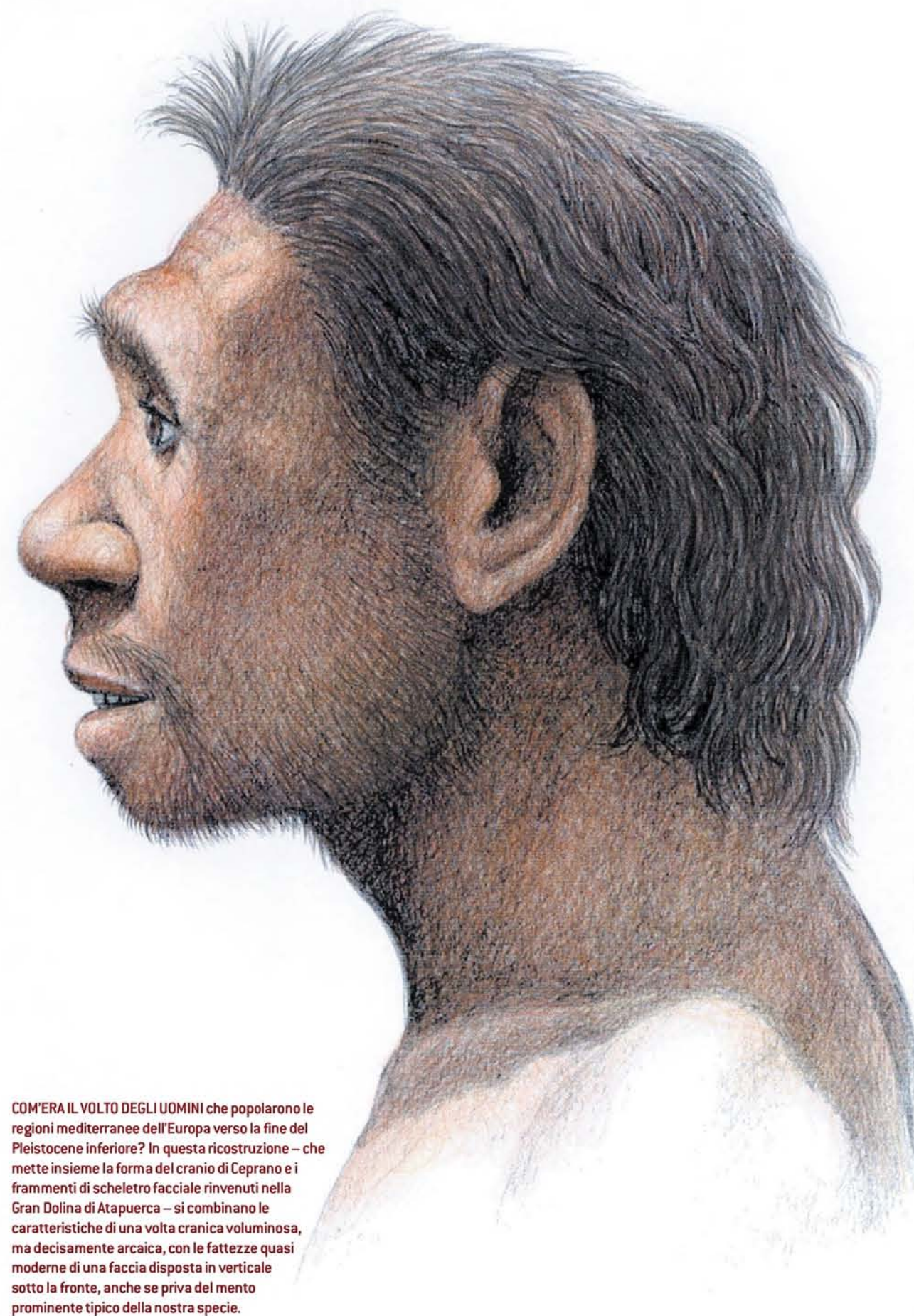
C'è ancora un'altra possibile metodica per produrre un vaccino: quella della cosiddetta genetica inversa (*reverse genetics*) ideata da Peter Palese, microbiologo della Mount Sinai School of Medicine di New York. «Palese – spiega Rappuoli – ha trovato un nuovo metodo per ottenere virus riassortanti: clona i segmenti di RNA del virus influenzale, ne ottiene altrettanti "plasmidi" e introduce questi ultimi all'interno delle cellule (cioè le "transfetta")». Ecco spiegato il nome della tecnica: per fare un nuovo virus riassortante, invece di partire da due virus si parte direttamente dal genoma virale che è stato diviso nei diversi plasmidi. Sono tre i laboratori – che fanno capo al network sull'influenza coordinato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità – impegnati a sviluppare questo tipo di vaccino: uno ai Centers for Disease Control and Prevention di Atlanta, l'altro al St. Jude Children's Research Hospital a Memphis e il terzo al National Institute for Biological Standardization and Control di Londra. E comunque, alla fine, prima dell'immissione in commercio, anche questo vaccino dovrebbe essere sottoposto a test di efficacia e sicurezza nell'uomo.

Nel futuro, anticipa l'esperto della Chiron, si profila un vaccino dotato di un livello di sicurezza in più: «Abbiamo ingegnerizzato un virus – confida Rappuoli – in cui introduciamo i geni dell'influenza ottenendo una chimera che, rispetto all'adenovirus comunemente impiegato, infetta le cellule senza replicarsi. E vaccina». E in ogni caso, all'attuale temibile avanzata del virus H5N1 dei polli siamo in grado di rispondere subito: «Disponiamo di riassortanti che hanno gli antigeni H5N1 – assicura il virologo, confermando i contatti già in corso con l'OMS e i CDC – e quindi siamo in lizza per avviare la produzione del vaccino».

Argil, antenato d'Europa

Un cranio umano fossile rinvenuto in Italia contribuisce a ripensare fasi cruciali dell'evoluzione che precedettero la comparsa di *Homo sapiens*

di Giorgio Manzi

Era il marzo del 1994, quando la pala meccanica di una ruspa al lavoro nel tracciato di una nuova strada tra le cittadine di Ceprano e Pofi, nella bassa Valle Latina, quasi al confine tra Lazio e Campania, tagliò come un coltello i sedimenti, sconvolgendo la quiete dei resti fossili di un cranio che giacevano lì da centinaia di millenni, intrappolati in un grigio strato di argilla. Forse la ruspa ne portò via una parte – magari l'intero scheletro facciale, con tutti i denti – ma ebbe il merito di riportare in luce quei frammenti, oltre cinquanta, che avrebbero ben presto destato l'interesse della comunità scientifica internazionale.

COM'ERA IL VOLTO DEGLI UOMINI che popolarono le regioni mediterranee dell'Europa verso la fine del Pleistocene inferiore? In questa ricostruzione – che mette insieme la forma del cranio di Ceprano e i frammenti di scheletro facciale rinvenuti nella Gran Dolina di Atapuerca – si combinano le caratteristiche di una volta cranica voluminosa, ma decisamente arcaica, con le fattezze quasi moderne di una faccia disposta in verticale sotto la fronte, anche se priva del mento prominente tipico della nostra specie.

Mauricio Antón

Capitò poi che alcuni giorni dopo, la mattina di domenica 13 marzo, passasse di lì Italo Biddittu, paleontologo per passione. Biddittu non era lì per caso. Era stato lui, assieme ad altri ricercatori dell'Istituto italiano di paleontologia umana (IsIPU), a ritrovare, in oltre 30 anni di ricognizioni un po' in tutto il Lazio meridionale, migliaia di documenti di frequentazioni paleolitiche, raccogliendo una quantità di manufatti: ciottoli sgrossati rozzamente e schegge silicee di vario tipo, ma anche quei tipici strumenti bifacciali che gli archeologici preistorici chiamano amigdale (per la loro vaga forma a mandorla) o asce-a-mano. Documenti della più antica preistoria raccolti oggi nel Museo preistorico regionale di Pofi, di cui Biddittu è formalmente il direttore, oltre a esserne il creatore e l'instancabile animatore. E che provengono da decine di siti: Colle Marino, Arce e Fontana Liri, Castro dei Volsci, Pofi, Ceprano...

Quella mattina del 13 marzo 1994 fu l'occhio esperto di Biddittu a distinguere nell'argilla i frammenti fossili del cranio di un rappresentante di un'umanità estinta del Paleolitico inferiore: quell'uomo di Ceprano che Biddittu, col privilegio dello scopritore, ha battezzato Argil, come il sedimento in cui era conservato.

I dieci anni trascorsi dal ritrovamento sono stati densi di studi. Subito dopo la scoperta, una piccola squadra dell'IsIPU coordinata dal geologo Aldo G. Segre e dalla paleontologa Eugenia Segre Naldini fu occupata per settimane in un paziente lavoro di setacciatura del terreno e di analisi stratigrafica. La scoperta fu notificata alla Soprintendenza per i beni archeologici del Lazio, che in seguito confermerà all'IsIPU l'autorizzazione allo studio dello straordinario reperto e a effettuare scavi e ricerche geologiche, paleontologiche e archeologico-preistoriche nell'area, ricerche che sono tuttora in pieno svolgimento.

Prima che il fossile umano potesse essere studiato in modo approfondito, fu necessario ricostruirlo a partire dalla cinquantina di frammenti rinvenuti. Un lavoro che – tra operazioni tecniche, confronti e revisioni critiche – ha richiesto diversi anni e la collaborazione di parecchie mani: quelle di Antonio Ascenzi e Pierfrancesco Cassoli (1994-1995), dello specialista sudafricano Ron J. Clarke (1998), della paleoantropologa francese Marie-Antoinette de Lumley (1999) e, infine, del mio collega dell'Università di Pisa Francesco Mallegni (1999). Ne è risultato un cranio di proporzioni massicce, appartenuto a un poderoso maschio adulto di una specie arcaica del genere *Homo*. Purtroppo, è un cranio senza volto: e questo ne accentua la natura in parte enigmatica. Nonostante le analisi minuziose effettuate a suo tempo sul terreno, il cranio è rimasto infatti privo della faccia (l'assenza di denti, in particolare, è una seria lacuna ai fini dell'interpretazione del reperto). Ciò nonostante, il cranio di Ceprano mostra una morfologia sorprendente (rispetto alle conoscenze precedenti) ed estremamente significativa. Se, da un lato, non si era mai visto un ominide così arcaico in Europa, con forti reminiscenze africane e asiatiche, dall'altro Argil mostra anche chiari segni di progressione verso l'umanità del periodo successivo, quella del Pleistocene medio dell'Europa e dell'Africa. Un reperto davvero unico, enigmatico e importantissimo. Di certo, uno dei più importanti fossili umani mai scoperti sul territorio europeo.

E infatti, oggi del cranio di Ceprano si parla e si discute parecchio nella comunità scientifica internazionale. Per almeno due buone ragioni: la questione della cronologia del fossile umano e del tipo di manufatti paleolitici che gli vengono attribuiti; e quella della specie umana a cui poteva appartenere l'individuo che aveva quel cranio. Sono questioni di cui non tutti avevano una percezione chiara a metà degli anni novanta, anche perché proprio in quell'epoca si erano riaccese le antiche controversie sul primo popolamento dell'Europa e sul numero di specie rappresentate dal record fossile ominide. E proprio nell'intreccio del dibattito che si andava affermando intorno a queste due questioni si andarono a inserire le ricerche sul cranio fossile di Ceprano.

Cortesia Giorgio Manzi

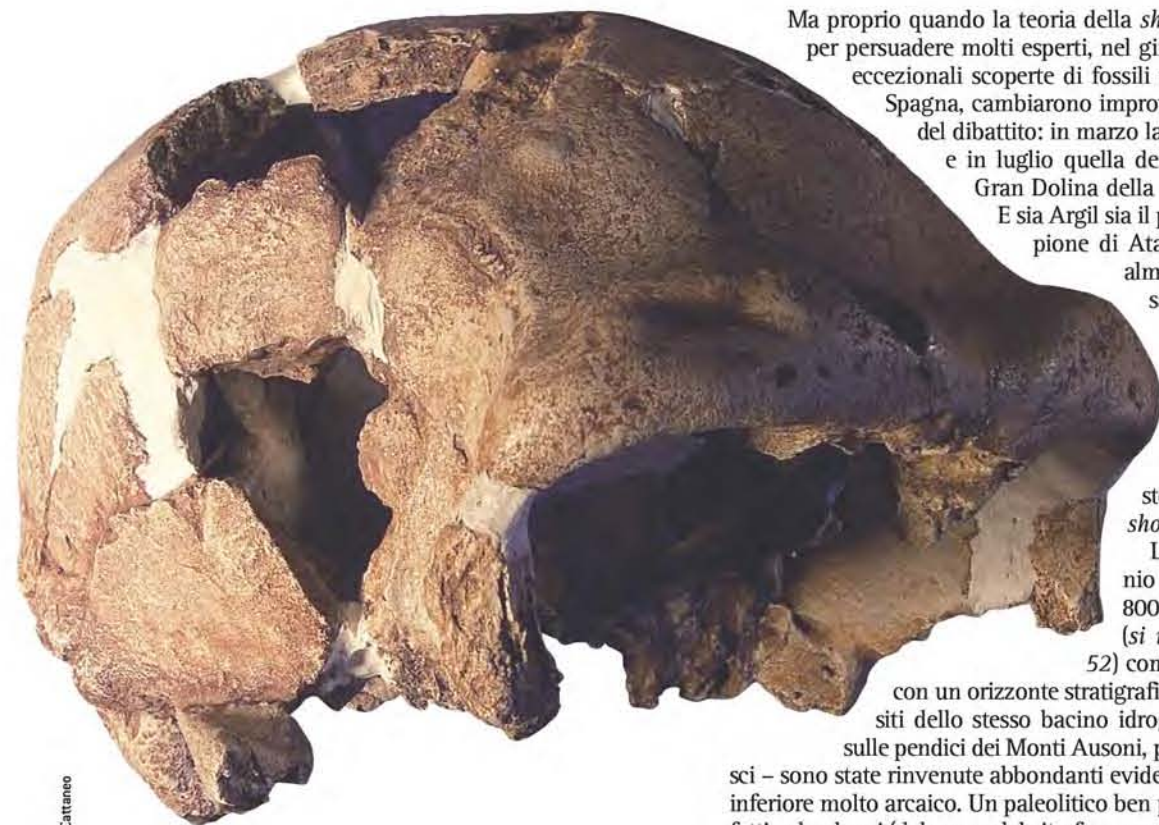
Marco Cattaneo

IL CRANIO DELL'OMINIDE DI CEPRANO e un'immagine dei primi quadrati di scavo aperti alla ripresa delle attività di terreno a Campogrande di Ceprano nel 2001.

IN SINTESI

- Nel marzo 1994, durante i lavori per la costruzione di una nuova strada tra Ceprano e Pofi, nel basso Lazio, furono riportati alla luce i frammenti fossili di un cranio appartenuto a un ominide del Paleolitico inferiore.
- Quello di Ceprano è un cranio di proporzioni massicce, appartenuto a un maschio adulto di una specie arcaica del genere *Homo*. In esso si combinano una volta cranica voluminosa, ma decisamente arcaica, con le fattezze quasi moderne di una faccia disposta in verticale anche se priva del mento prominente tipico di *Homo sapiens*.
- A distanza di dieci anni, gli studi condotti su Argil, il cranio di Ceprano, permettono di datarne l'età a 800.000-900.000 anni fa, vale a dire lo stesso periodo a cui risalgono i frammenti dello scheletro facciale di almeno sei individui rinvenuti nello strato TD6 della Gran Dolina di Atapuerca, in Spagna.
- Sembra ragionevole concludere che il primo popolamento dell'Europa mediterranea sia avvenuto poco dopo un milione di anni fa, e che i reperti di Ceprano e Atapuerca appartengano a una stessa specie di «esploratori», chiamata *Homo antecessor*.

Vita breve di una «cronologia breve»

Nella primavera del 1994, proprio mentre Italo Biddittu si imbatteva nei frammenti di Argil, la rivista scientifica «Nature» annunciava il rinvenimento del più antico fossile umano mai scoperto in Europa. La foto di copertina riportava una porzione di tibia proveniente dal sito di Boxgrove, in Inghilterra, e, all'interno, un articolo enfatizzava l'importanza del reperto per le nostre conoscenze sul primo popolamento del continente europeo. Tuttavia, per quanto la tibia di Boxgrove apparisse in quel momento come il più antico fossile umano d'Europa, era in realtà l'ennesimo reperto che si attestava intorno a una datazione di circa 500.000 anni fa. Nella percezione di molti addetti ai lavori, la scoperta di Boxgrove suonò perciò come la conferma di una teoria che veniva proposta, proprio in quegli anni, da due specialisti olandesi: Wil Roebroeks e Thijs van Kolfschoten.

Alla teoria era stato dato il nome di *short chronology*, volendo con questo intendere che sul nostro continente non ci furono esseri umani prima di 500.000-600.000 anni fa. Malgrado l'Europa sia stata a lungo al centro dell'interesse dei ricercatori, infatti, non erano mai stati scoperti fossili umani più antichi di quella data limite, il più noto dei quali è la mandibola rinvenuta a Mauer, presso Heidelberg, in Germania, nel 1907, che aveva dato il nome alla specie *Homo heidelbergensis*. L'evidenza di ipotetiche presenze umane più antiche poggiava solo su rinvenimenti di tipo archeologico effettuati in varie parti d'Europa: in Spagna meridionale, nella regione intorno al pueblo di Orce, in Francia, nel sito di Vallonet, e in altre località, anche italiane: a Montepoggiolo, nel Forlivese, o a Isernia, in Molise. Non reperti fossili però, ma solo manufatti: documenti indiretti della presenza dell'uomo. Peraltro, argomentavano Roebroeks e van Kolfschoten, se si fossero passati in rassegna uno per uno i siti europei di questa presunta antichità (più vecchi cioè di 500.000-600.000 anni fa), si sarebbe dovuto constatare che alcuni sono datati in modo discutibile, altri non lo sono proprio, altri ancora non sono neanche siti, ma rinvenimenti occasionali di superficie. In sostanza, nessuna di queste testimonianze di una presunta *long chronology* del primo popolamento europeo sarebbe riuscita a superare il vaglio di una critica severa.

Ma proprio quando la teoria della *short chronology* stava per persuadere molti esperti, nel giro di pochi mesi due eccezionali scoperte di fossili umani, in Italia e in Spagna, cambiarono improvvisamente i termini del dibattito: in marzo la scoperta di Ceprano e in luglio quella dei fossili umani nella Gran Dolina della Sierra de Atapuerca. E sia Argil sia il più abbondante campione di Atapuerca (riferibile ad almeno sei individui) risalgono a 800.000-900.000 anni fa. Precedono cioè di almeno 300.000 anni il limite del più antico popolamento d'Europa posto dai sostenitori della *short chronology*.

La datazione del cranio di Ceprano a circa 800.000-900.000 anni fa (*si veda la finestra a p. 52*) comporta l'associazione con un orizzonte stratigrafico nel quale – in altri siti dello stesso bacino idrografico, per esempio sulle pendici dei Monti Ausoni, presso Castro dei Volsci – sono state rinvenute abbondanti evidenze di un Paleolitico inferiore molto arcaico. Un paleolitico ben più antico dei manufatti acheuleani (dal nome del sito francese di St. Acheul), caratterizzati da amigdale e da una tecnologia litica differente, che si trovano disseminati nella stessa regione, come in altre parti d'Italia e nel resto del continente europeo, ma solo a partire da circa 600.000 anni fa.

Analoghe tracce di un passato pre-acheuleano si incontrano nella Sierra de Atapuerca, a nord della penisola iberica. La Sierra è una piccola collina, bassa e allungata, sezionata per un tratto di alcune centinaia di metri alla fine del XIX secolo allo scopo di farvi transitare una linea ferroviaria locale che venne poi smantellata negli anni venti del secolo successivo. Ma non fu lavoro sprecato: il taglio mise in luce il riempimento detritico di alcune cavità carsiche, che sono oggetto dell'attenzione dei paleoantropologi spagnoli da almeno una ventina d'anni e sono ormai note come uno dei più importanti complessi preistorici del mondo. In particolare, la Gran Dolina di Atapuerca è uno dei più notevoli tra i siti della Sierra. Grazie al taglio di fine Ottocento, il riempimento di sedimenti stratificati è visibile in sezione per tutta la sua vastità, oggi in parte oscurata dal poderoso traliccio di tubi e tavole metalliche che consente ai ricercatori spagnoli di raggiungere i vari livelli del deposito. Da alcuni anni, infatti, hanno iniziato uno scavo in estensione su una superficie di svariate decine di metri quadrati, a partire dai livelli più alti. E così stanno procedendo tuttora, essendo arrivati, strato dopo strato, fino al livello TD10, che è ancora uno dei più alti nella stratigrafia ed è riferibile a fasi avanzate del Pleistocene medio. Ma inferiormente si nota che era stato già praticato un sondaggio, a sezione quadrangolare, che percorre (come fosse il vano di un ascensore) tutta l'estensione verticale degli strati.

È qui che nel luglio del 1994 – pochi mesi dopo la scoperta di Argil – una squadra di archeologi diretta da Eudal Carbonell dell'Università di Tarragona rinvenne nel livello TD6 del sondaggio (cioè in uno dei livelli bassi nella stratigrafia del giacimento, ricco di manufatti pre-acheuleani) 80 frammenti fossili umani, quasi tutti riferibili a individui ancora nell'età della crescita. Diversi elementi – quali la biostratigrafia e il paleomagnetismo – contribuiscono a datare i fossili a oltre 780.000 anni fa.

Un altro gruppo dell'équipe interdisciplinare che lavora ad Atapuerca, quello coordinato da José M. Bermúdez de Castro del Museo di storia naturale di Madrid, ha studiato con particolare attenzione denti e porzioni di mandibole. Ha così potuto mettere in evidenza un certo numero di caratteri (soprattutto dentari) che distinguono i fossili della Gran Dolina da altre forme umane estinte, a tal punto da meritare l'attribuzione a una nuova specie, che nel 1997 è stata denominata *Homo antecessor* (che significa «uomo esploratore»). Un altro gruppo ancora, che fa capo a Juan Luis Arsuaga dell'Università Complutense di Madrid, ha infine aggiunto una considerazione fondamentale. Analizzando i frammentari reperti cranici disponibili – e soprattutto una porzione molto ben conservata di scheletro facciale appartenuta a un bambino di circa 10 anni – Arsuaga e i suoi sono giunti alla conclusione che *H. antecessor* potrebbe rappresentare l'ultimo antenato comune al Neandertal (*H. neanderthalensis*) e all'uomo moderno (*H. sapiens*). Il campione fossile della Gran Dolina farebbe quindi parte di quella specie umana che si è trovata alla radice della divergenza tra due linee evolutive: quelle che hanno rispettivamente condotto – nel corso di tutto il Pleistocene medio (tra 780.000 e 130.000 anni fa) – all'evoluzione dell'uomo di Neandertal in Europa e all'origine della nostra stessa specie in Africa.

La questione della specie

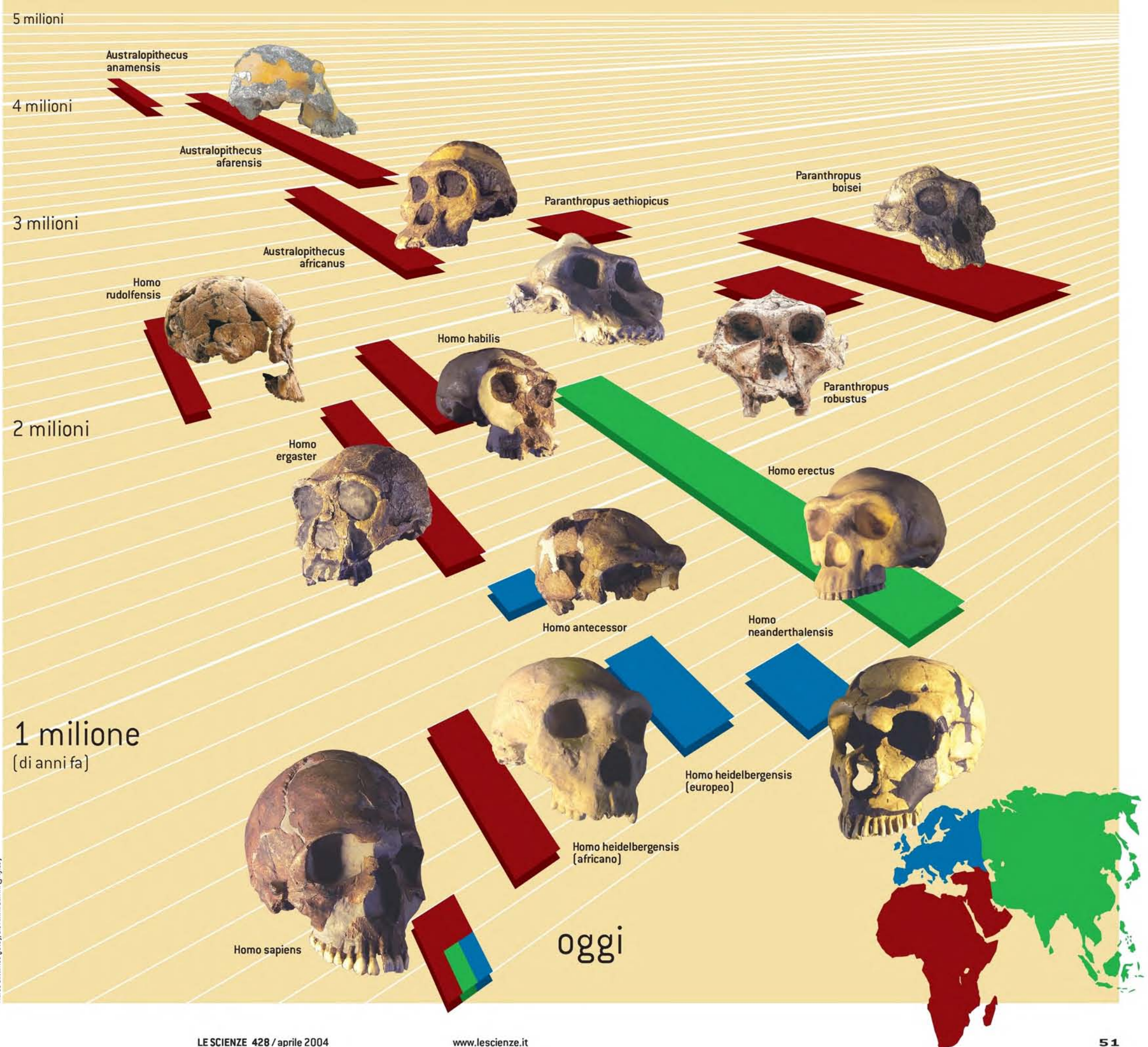
È qui che s'innesta anche la seconda delle questioni su cui Argil può dare indicazioni interessanti. Liberato il campo dall'antica ipotesi dell'esistenza di una sola specie per buona parte dell'evoluzione umana, i paleoantropologi si dividono oggi sull'identificazione del numero di specie che si sono susseguite nel corso del Pleistocene, a partire dalle origini del genere *Homo* (verso i due milioni di anni fa in Africa) fino alla comparsa e all'affermazione della specie moderna, *H. sapiens* (a partire da circa 150.000 anni fa). Questo problema non va confuso con l'eccesso di denominazioni binomie in latino nel quale si erano distinti i paleoantropologi del passato. Piuttosto, trattando di evoluzione umana, il problema è che ci si muove al delicato confine tra specie e sottospecie (varietà geografica o razza), ovvero tra il fenomeno della macroevoluzione – origine delle specie e delle categorie tassonomiche superiori – e quello della microevoluzione all'interno della specie. È un po' come se, analizzando in dettaglio il caso particolare del genere *Homo*, si avesse l'opportunità di vedere l'evoluzione al lavoro ma si avesse difficoltà a segnare una distinzione netta tra i due fenomeni e, quindi, a identificare con sicurezza il confine fra una specie e l'altra. Almeno per ora.

Una delle prime possibili specie del genere *Homo* viene riconosciuta da molti di noi in *Homo ergaster*. Comparsa senza clamore nella letteratura specialistica nel 1975, questa specie ha assunto un ruolo di primo piano nella filogenesi del genere *Homo* quando, negli anni ottanta, si rese necessario identificare un *taxon* in cui inserire i reperti africani compresi fra la fine del Pliocene e l'inizio del Pleistocene (tra circa 1,9 e 1,6 milioni di anni fa) rinvenuti presso il Lago Turkana, in Kenya. In contrasto con

LA LUNGA VICENDA EVOLUTIVA DELLA NOSTRA SPECIE passa attraverso due diverse migrazioni dall'Africa. La prima segnò l'evoluzione di *H. erectus* in Asia e *H. antecessor* in Europa, la specie a cui apparterrebbero il cranio di Ceprano e i fossili della Gran Dolina di Atapuerca. I crani raffigurati in questo schema corrispondono ai seguenti reperti: *A. afarensis*, A. L. 444-2, Hadar, Etiopia; *A. africanus*, Sts 5, Sterkfontein, Sudafrica; *P. aethiopicus*, KNM-WT 17.000, West Turkana, Kenya; *P. robustus*, SK 6, Swartkrans, Sudafrica; *P. boisei*, KNM-ER 406, Koobi Fora, Kenya; *H. rudolfensis*, KNM-ER 1470, Koobi Fora, Kenya; *H. habilis*, OH 24, Olduvai Gorge, Tanzania; *H. ergaster*, KNM-ER 3733, Koobi Fora, Kenya; *H. erectus*, Zhoukoudian, Cina; *H. antecessor*, Ceprano, Italia; *H. heidelbergensis*, Petralona, Grecia; *H. neanderthalensis*, La Ferrassie, Francia; *H. sapiens*, Qafzeh 9, Israele.

Marco Cattaneo (*foto*), Giovanna Salvini (*grafico*)

L'ETÀ DI ARGIL

Cortesia Giorgio Manzi (2)

Su cosa poggiano gli 800.000-900.000 anni di antichità attribuiti ad Argil? Dobbiamo questa conclusione al geologo e paleontologo Aldo Segre, che aveva raccolto in passato una quantità di dati in tutta l'area del bacino idrografico del fiume Sacco (che scorre a poca distanza dal sito di Ceprano) e che fu pertanto in grado di interpretare con prontezza il contesto geo-stratigrafico nel quale venne rinvenuto il cranio.

Da questo punto di vista è cruciale l'ipotesi che lo strato di argilla grigia (nel quale il cranio era incluso e che fornì l'ispirazione per il nome del fossile) si sia deposto in un'epoca anteriore a 700.000 anni fa. Lo dimostra un livello di discontinuità stratigrafica posto poco al di sopra dell'argilla e che marca una distinzione fondamentale tra la presenza (sopra) e l'assenza (sotto) di elementi vulcanici attribuibili, in base a datazioni radiometriche, all'intervallo compreso fra 100.000 e 700.000 anni fa. La discontinuità stratigrafica segna un'interruzione nel processo deposizionale. Dopo questa interruzione, il riattivarsi del sistema diffuse nei sedimenti le scorie vulcaniche che segnano il limite dei 700.000 anni. Sotto, invece, gli strati – e quindi anche l'argilla del cranio – devono essere considerati più antichi di questo limite.

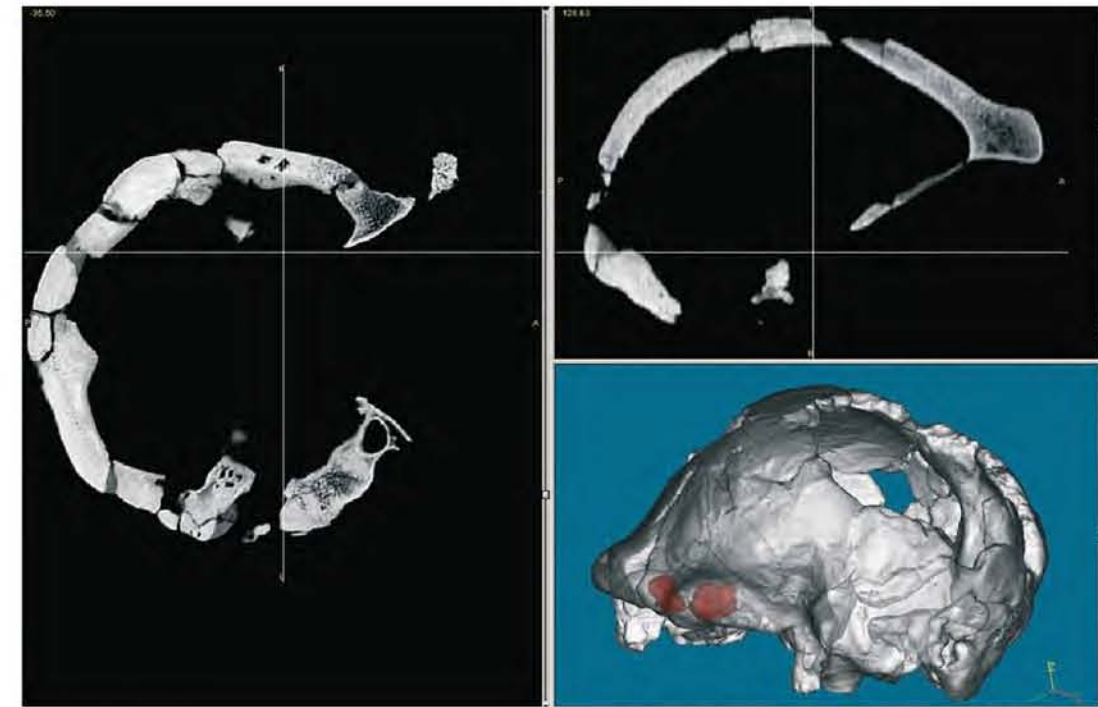
Questa considerazione si associa alla presenza, nella sequenza di livelli sovrapposta alla discontinuità stratigrafica, di manufatti litici paragonabili a quelli di un altro sito ben noto nel contesto regionale: Fontana Ranuccio, presso Anagni. Qui è stato rinvenuto un importante complesso faunistico e archeologico, riferito a un Paleolitico inferiore con bifacciali (chiamato Acheuleano), datato a circa 460.000 anni fa. In strati sottostanti la discontinuità si trovano invece manufatti più arcaici, prodotti su ciottolo o su scheggia, che potrebbero risalire forse fino a un milione di anni fa e oltre. Si ha dunque una forchetta di date che si stringe intorno all'intervallo degli 800.000-900.000 anni fa attribuiti ad Argil.

C'è poi anche da considerare la natura secondaria della deposizione del cranio stesso. Con buona probabilità, il fossile si trovava originariamente in altri sedimenti più antichi, dove iniziò il processo di fossilizzazione, per poi essere eroso e trasportato dall'azione delle acque nello strato di argilla in cui, centinaia di millenni dopo, venne ritrovato. Se dunque l'argilla potrebbe risalire a un'epoca anche di poco anteriore a 700.000 anni, il cranio deve essere più antico. Esiste cioè un lasso di tempo che si aggiunge agli oltre 700.000 anni dell'argilla e che non possiamo misurare, ma la cui estensione sembra essere suggerita dagli elementi che abbiamo a disposizione, indicando una probabile datazione del fossile umano a 800.000-900.000 anni fa.

A partire dal 2000, l'Istituto italiano di paleontologia umana e l'Università «La Sapienza» di Roma conducono scavi sistematici presso Ceprano, grazie a una positiva collaborazione con la Soprintendenza archeologica del Lazio (che segue anche i nostri studi sul cranio umano) e con le amministrazioni locali (in particolare quelle di Ceprano e di Pofi). Lo scopo è quantomeno duplice: in primo luogo si vuole verificare la datazione del reperto umano, ma soprattutto siamo interessati ad arricchire del maggior numero possibile di dettagli il contesto preistorico e paleoecologico nel quale il nostro uomo si trovava a vivere.

l'interpretazione dominante di allora, che identificava in questi reperti una variante africana arcaica di *H. erectus*, alcuni autori avevano messo in luce una serie di caratteri che distinguono i fossili africani da quelli asiatici su cui è basata la diagnosi di *Homo erectus*, che sono tipici dell'isola di Giava e di un certo numero di siti cinesi. Se accettiamo questa distinzione, vediamo allora una specie umana evolversi in Africa durante tutto l'intervallo compreso fra due milioni e un milione di anni fa. Si tratta di *H. ergaster*, appunto, distinto dalla specie asiatica *H. erectus*, che protrarrà invece la sua storia evolutiva in Asia fino a tempi molto recenti. Potrebbero appartenere alla specie africana anche un enigmatico cranio fossile rinvenuto in passato nella Gola di Olduvai, in Tanzania (contrassegnato dalla sigla OH9), o i più recenti importanti rinvenimenti di Buia, in Eritrea, e di Bouri, in Etiopia, entrambi datati a circa un milione di anni fa.

La questione si intreccia con un altro aspetto controverso riguardante la cronologia della prima diffusione extra-africana. Fino a non molto tempo fa, sembrava ormai accettato dalla maggior parte degli specialisti il fatto che, a partire da forme arcaiche di *Homo* in Africa, fosse iniziato un lentissimo processo di diffusione, attraverso il quale gli ominidi avrebbero raggiunto territori molto distanti dall'originaria «culla africana» solo dopo diverse centinaia di migliaia di anni. Oggi, invece, si dispone di datazioni comprese tra 1,8 e 1,6 milioni di anni fa per il primo popolamento dell'Estremo Oriente, e possibili testimonianze della presenza dell'uomo in Cina e nel sub-continente indiano prossime ai due milioni di anni. Sembrerebbe dunque che l'uomo abbia raggiunto l'Asia orientale quasi nella stessa epoca in cui ancora si andavano sviluppando le prime forme di *Homo* in Africa. Un'ipotesi a cui hanno portato decisivo sostegno le strabilianti scoperte di fossili molto arcaici nel Caucaso meridionale – a Dmanisi, in Georgia – datati a circa 1,75 milioni di anni fa. Si vanno affermando quindi sia un concetto di «versatilità ecologica» da parte dell'uomo sin dalla sua prima comparsa, sia la conclusione che questa potenzialità sia stata alla base di una diffusione molto precoce dall'Africa verso l'Eurasia.

E l'Europa? Per quanto il sito di Dmanisi sia oggi geo-politicamente in Europa, forse non può dirsi lo stesso dal punto di vista paleo-biogeografico. In altre parole, si è inclini a ritenere che la prima diffusione dell'uomo fuori dall'Africa abbia toccato le pendici meridionali del Caucaso per poi piegare verso Oriente. È probabile che barriere geografiche e fattori climatici abbiano influito in modo decisivo su questa tendenza dell'onda di diffusione a muoversi dapprima lungo i paralleli, piuttosto che lungo i meridiani. Solo in seguito, dunque, l'uomo arriverà anche in Europa: non dimentichiamoci infatti che tra la datazione di Dmanisi e quella dei più antichi europei conosciuti, come Argil, passa quasi un milione di anni. Se l'uomo arriva dunque in Europa soltanto intorno a un milione di anni fa, passando con ogni probabilità dalla regione a sud del Mar Nero, in corrispondenza dell'attuale stretto del Bosforo, i reperti fossili di Ceprano e di Atapuerca ci descrivono l'aspetto dei primi immigranti e, con le loro innegabili particolarità, sostengono l'ipotesi di un aspetto «cespuglioso» dell'albero filogenetico del genere *Homo*.

DALLA SCOPERTA *IN SITU* alla ricostruzione tridimensionale in laboratorio. A fronte, una delle poche immagini colte al momento della scoperta del cranio di Ceprano (la persona nella foto è Italo Biddittu). Con le lastre tomografiche del fossile (su fondo nero) si possono osservare molte strutture interne, come anche l'elevato spessore delle ossa della volta cranica, mentre nella ricostruzione 3D (su fondo azzurro) si vedono i rapporti relativi fra le varie parti anatomiche.

Ma c'è di più. Con Antonio Ascenzi e Francesco Mallegni abbiamo potuto dimostrare che la morfologia di Argil è davvero qualcosa di speciale, non facilmente assimilabile né alle caratteristiche di *H. ergaster*, né a quelle di *H. erectus*, ma nemmeno a quelle delle forme successive del Pleistocene medio, che si ritrovano in Africa e in Europa (parzialmente anche in Asia) e che vengono da alcuni riunite nella specie *H. heidelbergensis*. Il cranio di Ceprano può essere cioè descritto come una sorta di ponte morfologico tra queste specie, che rappresenta l'anello di congiunzione tra un'umanità più arcaica (*Homo ergaster/erectus*) e una più derivata (*Homo heidelbergensis*, nelle sue varietà). Se da un lato, infatti, la volta cranica di Argil appare estremamente bassa e angolata – arcaica, cioè, nel suo assetto architetturale – molti caratteri anatomici di dettaglio lo avvicinano un po' a tutti i *taxa* che abbiamo citato, ma a nessuno in particolare. In altre parole, l'antichità del nostro fossile si combina bene con i tratti più arcaici che possiede, ma al tempo stesso la datazione e la collocazione geografica si associano anche ad aspetti progressivi della sua morfologia (compreso un volume encefalico sorprendentemente elevato), e avvicinano l'uomo di Ceprano alle varietà di *Homo heidelbergensis* che si potranno incontrare in Africa e in Europa solo a partire da circa 600.000 anni fa.

Data la combinazione fra antichità, collocazione geografica e mosaico di caratteristiche morfologiche che presenta, il cranio di Ceprano può ben rappresentare l'antenato dei successivi ominidi europei e africani del Pleistocene medio. A loro volta, questi saranno gli antenati dell'uomo di Neandertal e della specie umana moderna, rispettivamente in Europa e in Africa. Va peraltro tenuto presente che in Africa non si hanno evidenze fossili nell'intervallo cronologico compreso fra un milione e 600.000 anni fa, proprio quello che al momento è ben rappresentato in Europa, a Ceprano e ad Atapuerca. Dunque il fossile italiano si candida come rappresentante dell'umanità che diede origine alla divergenza evolutiva tra le linee del Neandertal e di *Homo sapiens*.

Come abbiamo visto, il materiale fossile della Gran Dolina di Atapuerca condivide con Argil questa posizione filogenetica, oltre alla comune cronologia e topologia. Ed è interessante notare che le conclusioni a cui siamo giunti sia noi sia i colleghi spagnoli sono state ottenute attraverso percorsi indipendenti: loro hanno lavorato principalmente su denti e resti facciali di individui giovani, noi sulla volta cranica di un adulto. Ma le conclusioni sono sorprendentemente simili. È ragionevole ritenere – sia pure provvisoriamente, in attesa di confronti diretti al momento impossibili – che i reperti spagnoli e quello italiano appartengano alla stessa specie. Pertanto, se proprio si vuole dare al cranio di Ceprano una denominazione in latino – e sebbene sia stata proposta di recente l'attribuzione di Argil a una specie a sé stante, *Homo cepranensis* – sembra ragionevole riferirsi a una varietà di *Homo antecessor* (che ha priorità secondo le norme internazionali di nomenclatura) e parlare di *Homo antecessor cepranensis*.

L'AUTORE

GIORGIO MANZI è docente di paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia animale e dell'uomo dell'Università «La Sapienza» di Roma, segretario generale dell'Istituto italiano di paleontologia umana (http://w3.uniroma1.it/isipu) e *associate editor* della «Rivista di Antropologia». Le sue ricerche riguardano in particolare il primo popolamento dell'Europa, l'evoluzione dell'uomo di Neandertal e le origini di *Homo sapiens*. Dal 1999 partecipa allo studio del cranio di Ceprano e, dall'anno successivo, co-dirige scavi sistematici nell'area di questo importante sito preistorico.

PER APPROFONDIRE

ARSUAGA J. L., *I primi pensatori e il mondo perduto di Neandertal*, Feltrinelli, 2001.

BIONDI G. e RICKARDS O., *Quale antenato?*, in «Le Scienze», n. 421, pp. 28-35, settembre 2003.

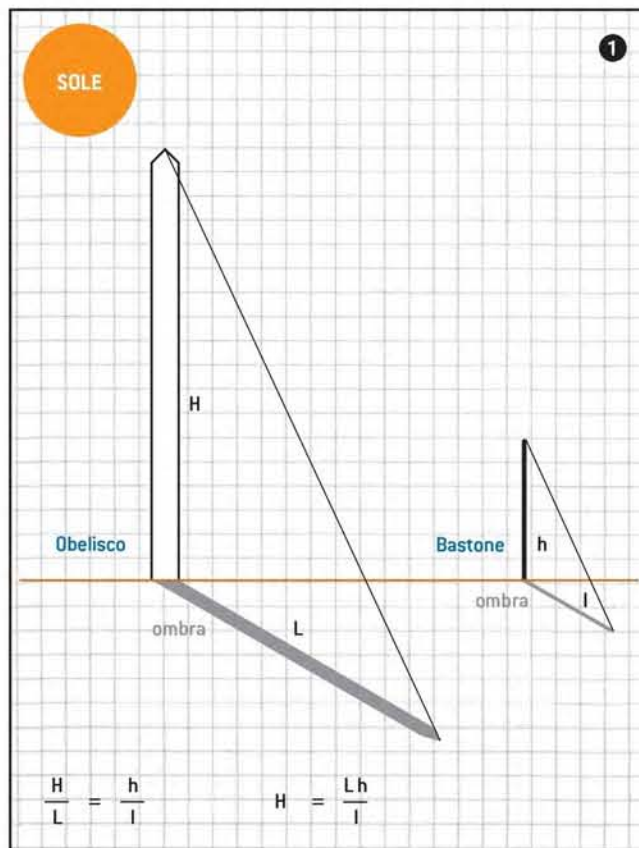
MANZI G., MALLEGNI F. e ASCENZI A., *A cranium for the earliest Europeans: Phylogenetic position of the hominid from Ceprano, Italy*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», vol. 98, pp. 10011-10016, agosto 2001.

MANZI G.. *Human evolution at the Matuyama-Brunhes boundary*, in «Evolutionary Anthropology», Vol. 13, pp. 11-24, gennaio 2004.

Variazioni pitagoriche

Riflessioni intorno al teorema più famoso del mondo, alla sua dimostrazione e ai suoi limiti nelle geometrie non euclidee

di Piergiorgio Odifreddi

Così parlò Proclo nel suo *Commento* al Primo Libro di Euclide, riferendosi a quello che è certamente il più famoso teorema della matematica di ogni tempo: «Se diamo retta a coloro che raccontano la storia antica, ne troviamo di quelli che lo attribuiscono a Pitagora, e riportano che egli sacrificò un bue per onorarne la scoperta. Da parte mia, pur ammirando i suoi primi scopritori, io sono più impressionato dall'autore degli *Elementi*, non solo perché ne ha dato una chiara dimostrazione, ma perché l'ha generalizzato mediante gli incontrovertibili argomenti del suo Sesto Libro.» In queste poche righe è compressa una lunga vicenda intellettuale, le cui origini si perdono nel mito. Non sappiamo infatti chi per primo abbia scoperto il teorema che la tradizione unanimemente attribuisce a Pitagora, forse perché egli fu il primo a trovarne una qualche dimostrazione. Dice infatti ancora Proclo: «Pitagora trasformò lo studio della geometria in un'arte liberale, esaminando i princìpi di questa scienza dai fondamenti e mettendo alla prova i teoremi in modo immateriale e intellettuale: fu infatti lui a scoprire la teoria delle proporzioni, e la costruzione delle figure cosmiche.»

La teoria delle proporzioni appena citata, di cui tratta il Sesto Libro di Euclide, sta appunto all'origine della geometria. Problemi relativi al calcolo delle proporzioni delle piramidi compaiono già nel Papiro di Rhind, risalente al 1700 a.C. ma copia di un originale del 2200 a.C. E il mito di formazione della geometria greca, riportato in varie versioni da Diogene Laerzio nelle *Vite e opinioni dei filosofi illustri*, da Plinio nella *Storia naturale*, e da Plutarco nelle *Conversazioni dei sette saggi*, narra che Talete misurò l'altezza delle piramidi (il cui nome deriva da *piremus* o *peremus*, che significa appunto «altezza» in egiziano) osservando che in triangoli *retti* simili i lati corrispondenti sono proporzionali (*si veda la figura 1*).

Dimostrazioni del teorema di Pitagora

Nella versione più antica del mito Talete si limitò a usare triangoli retti *isosceli* (da *isos*, «uguale», e *skelos*, «gamba»), aspettando un momento in cui il Sole fosse a 45 gradi, e un bastone piantato perpendicolarmente al terreno gettasse dunque un'ombra uguale alla sua lunghezza. Ma una volta notato il risultato per triangoli retti *qualunque*, il teorema di Pitagora si può dimostrare facilmente, tracciando l'altezza relativa all'ipotenusa, e notando che essa divide il triangolo originario in due triangoli a esso simili (*si veda la figura 2*).

Euclide prova i risultati su cui si basa questa dimostrazione nel suo Sesto Libro, più precisamente nelle Proposizioni VI.4 e VI.8, ma aveva già dato una diversa dimostrazione del teorema di Pitagora nella Proposizione I.47 del Primo Libro, basandosi su una teoria della scomposizione delle aree di probabile origine pitagorica. Questa nuova dimostrazione fu probabilmente in parte ispirata dalla precedente, che dimostra come il quadrato costruito sull'*ipotenusa* («sottesa», da *hypo*, «sotto», e *teinein*, «tendere») è scomponibile in due rettangoli equivalenti ai due quadrati costruiti sui *cateti* («in verticale», da *kathiemi*, «lasciar cadere»).

Ancora una volta, probabilmente, il primo passo fu fatto considerando triangoli retti isosceli e usando la figura resa popolare dal *Menone* di Platone, nel quale si dimostra appunto questo caso particolare del teorema di Pitagora, e che costituisce la prima testimonianza storica che ci sia pervenuta di una qualunque dimostrazione matematica. Generalizzando la figura a triangoli retti qualunque, come fa Euclide nella Proposizione II.4, che traduce geometricamente la formula algebrica per il quadrato di un binomio, si ottiene una dimostrazione alternativa del teorema di Pitagora, che si basa implicitamente su assunzioni quali l'esistenza di quadrati e la possibilità del moto rigido di figure (*si veda la figura 3*).

Da questa seconda dimostrazione si ricava di nuovo, in maniera meno immediata che nella precedente, ma più vicina allo spirito della dimostrazione di Euclide della Proposizione I.47, che il quadrato costruito sull'ipotenusa è scomponibile in due rettangoli equivalenti ai due quadrati costruiti sui cateti: basta infatti considerare due coppie consecutive di parallelogrammi aventi la stessa area, perché aventi la stessa base e la stessa altezza (*si veda la figura 4*).

La dimostrazione del fatto, provato da Euclide nella Proposizione I.35, che due parallelogrammi con la stessa base e la stessa altezza hanno la stessa area, si ottiene facilmente basandosi sul criterio di uguaglianza LAL per triangoli aventi due lati (L) e l'angolo (A) compreso uguali, che Euclide «dimostra» come Proposizione I.4 (*si veda la figura 5*). E per bisezione si ottiene facilmente anche la Proposizione I.41, secondo la quale l'area di un triangolo è metà dell'area di un parallelogramma avente la stessa base e la stessa altezza.

L'AFFRESCO DI RAFFAELLO *La scuola di Atene*, dipinto tra il 1509 e il 1510 nella Stanza della Segnatura del Palazzo Apostolico in Vaticano. In basso a destra, Euclide, circondato dagli allievi, traccia una figura su una lavagna, mentre Pitagora, seduto a sinistra, è intento a scrivere.

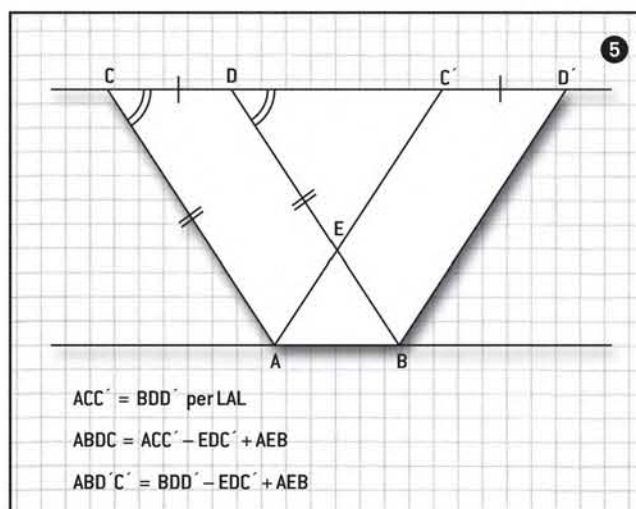
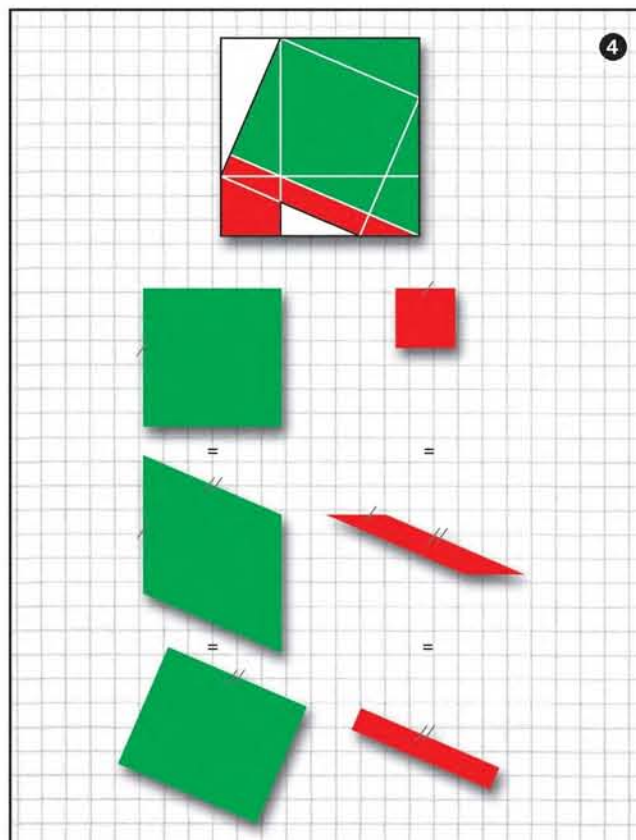
A questo punto abbiamo tutti gli ingredienti per la dimostrazione di Euclide del teorema di Pitagora, che è anche la prima che ci sia pervenuta. Essa scompone l'area del quadrato costruito sull'ipotenusa in due rettangoli, che risultano avere la stessa area dei quadrati costruiti sui cateti, perché di area doppia di due coppie di triangoli con le loro stesse basi e altezze, e che a loro volta sono uguali fra loro per il criterio LAL (*si veda la figura 6*).

Leggendo il Primo Libro degli *Elementi*, che si conclude appunto con la dimostrazione del teorema di Pitagora e del suo inverso (il fatto, cioè, che se in un triangolo il quadrato costruito su un lato equivale alla somma dei quadrati costruiti sugli altri due, allora il triangolo è rettangolo), si intuisce che Euclide deve aver costruito il libro a ritroso, riducendo via via le proprietà usate ad altre più elementari, e arrivando infine a isolare i suoi famosi cinque *postulati*:

1) per due punti passa un segmento;
2) ogni retta è illimitata, nel senso che ogni segmento è estendibile;
3) con centro in un punto, si può costruire un cerchio di raggio dato;
4) gli angoli retti sono tutti uguali fra loro;
5) se due rette formano, da una parte di una trasversale, angoli coniugati interni la cui somma è minore di due retti, esse si incontrano da quella parte della trasversale.

Infatti, tutte le proposizioni precedenti il teorema di Pitagora o sono usate nella sua dimostrazione, o sono state aggiunte per completezza e simmetria, in quanto inversi logici di proposizioni usate nella dimostrazione.

La trattazione di Euclide è il punto di arrivo di un millenario processo storico, le cui tappe salienti sono state lo sviluppo egizio della geometria quale agrimensura (da *ghe*, «terra», e *metrein*, «misurare») a partire almeno dal 2300 a.C., l'invenzione greca della dimostrazione da parte di Talete e Pitagora nel VI secolo a.C. e la prima sistematizzazione dei fondamenti negli *Elementi* di Ippocrate di Chios nel V secolo a.C.

Ma la trattazione di Euclide è anche il punto di partenza di successivi e altrettanto millenari sviluppi, ai quali ora rivolgiamo la nostra attenzione, e che riguardano tutti gli aspetti logici della dimostrazione del teorema di Pitagora: cioè, le definizioni delle nozioni, la necessità e la sufficienza degli assiomi, e la correttezza delle dimostrazioni delle proposizioni ausiliarie.

La nozione di area

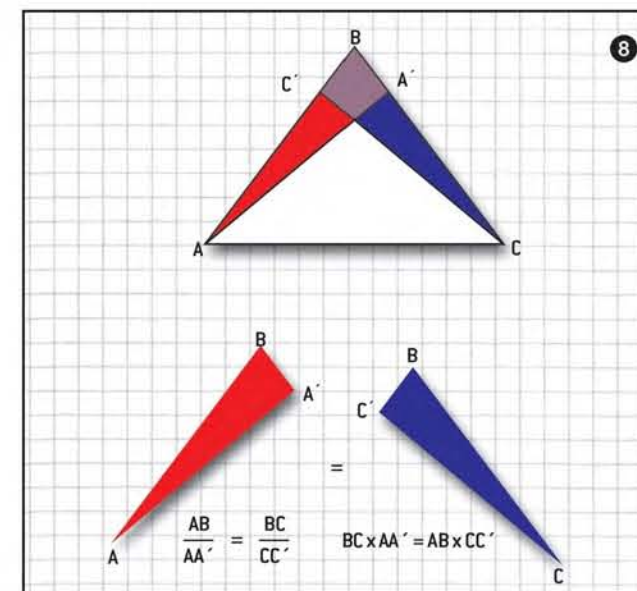
Una prima serie di problemi degli *Elementi* riguarda la nozione di *area*, che interviene direttamente nell'enunciato del teorema di Pitagora. Euclide non ne dà alcuna definizione, ma le sue cinque nozioni comuni mostrano che egli postulava per l'uguaglianza la *transitività* (cose uguali a una terza sono uguali fra loro), *l'additività* e la *sottraibilità* (se si aggiungono o si sottraggono cose uguali da cose uguali, si ottengono cose uguali), *l'invarianza* rispetto a coincidenza (cose coincidenti sono uguali) e la *monotonicità* rispetto all'inclusione (il tutto è maggiore della parte).

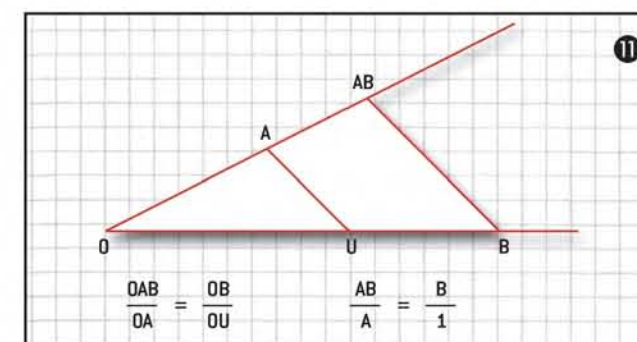
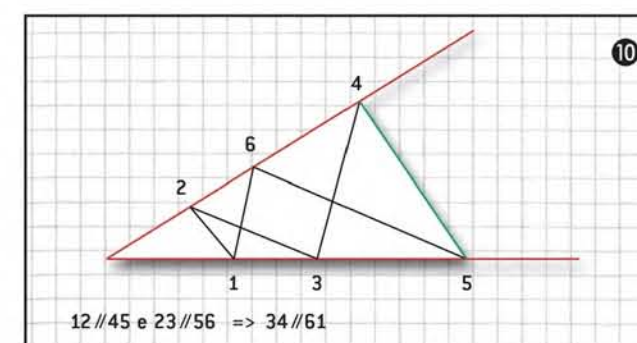
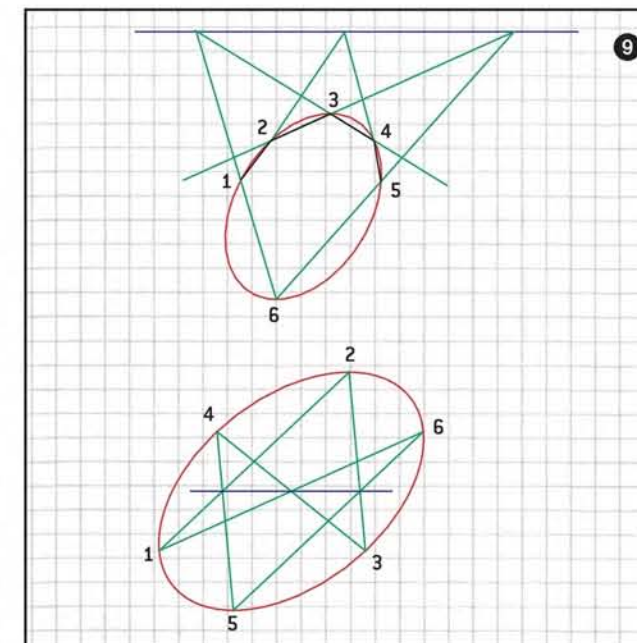
Inoltre, la dimostrazione della fondamentale Proposizione I.35 mostra che per Euclide esistono due nozioni di uguaglianza di area: la *equidecomponibilità*, che si ottiene suddividendo un poligono in uno stesso numero di triangoli, a due a due congruenti; e la *equicomplementabilità*, che è l'equidecomponibilità non dei poligoni stessi, ma di estensioni ottenute aggiungendo loro uno stesso numero di poligoni equidecomponibili. La seconda nozione è ovviamente più complicata: essa si riduce alla prima in presenza dell'*assioma di Archimede*, che afferma che riportando un numero di volte sufficiente un segmento si può eccederne qualunque altro (*si veda la figura 7*), ma non altrimenti. Dunque, Euclide fa bene a usare la seconda nozione nella sua trattazione.

Per la dimostrazione del teorema di Pitagora basta la nozione di *uguaglianza* di area, e non è necessario definirne una *misura*, come a prima vista invece sembrerebbe: la già citata Proposizione I.41 dice infatti che l'area di un triangolo è *metà* dell'area di un parallelogramma con stessa base e altezza; a sua volta, essa si basa sulla Proposizione I.34, secondo la quale una diagonale divide un parallelogramma in due triangoli di *metà* area. Ma è facile aggirare il problema, dimostrando direttamente che un triangolo è equidecomponibile con un parallelogramma che ha la stessa base e metà altezza: la bisezione dell'area di un poligono viene in tal caso ridotta alla bisezione di un segmento, che non è problematica.

Il problema della misura dell'area non si può però eludere oltre, se si vuole per esempio dimostrare, come fa appunto Euclide nelle Proposizioni I.37 e I.39, che due triangoli con la stessa base hanno la stessa area se e *solo se* hanno la stessa altezza. O, più in generale, che due poligoni hanno la stessa area se e *solo se* sono equicomplementabili (*teorema di Bolyai*). Una soluzione del problema è possibile anche nell'ambito della geometria euclidea, ma non è stata ottenuta che da David Hilbert nel 1899, nel suoi ormai classici *Fondamenti della geometria*.

Equidecomponibilità di parallelogrammi con stessa base e altezza

Sostanzialmente, si tratta di assegnare a un poligono, come misura della sua area, non un numero, ma un *segmento*, ottenuto in due passi: scomponendo il poligono in triangoli, e sommando le aree dei triangoli. L'area di un triangolo viene definita come «base per altezza diviso due», e si dimostra facilmente, mediante la Proposizione VI.4 della teoria delle proporzioni, che essa è indipendente dalla base scelta (*si veda la figura 8*). Meno facilmente, ma in maniera elementare, si dimostra che l'area di un poligono è indipendente dalla triangolazione scelta.

Naturalmente la cosa richiede lo sviluppo di un'algebra di segmenti, che permetta di addizionarli, sottrarli, moltiplicarli e dividerli. Le prime due operazioni sono immediate, ed erano già state definite da Euclide mediante riporti di segmenti su una stessa retta, nei due versi. Le ultime due operazioni sono invece più delicate: Euclide definiva il prodotto di due segmenti come l'area di un rettangolo, ma la cosa è circolare, se si vuole definire l'area mediante l'algebra dei segmenti.

Hilbert usa invece il *teorema di Pappo*, provato verso il 300 a.C. nella *Collezione matematica*, che è una forma degenere del *teorema di Pascal*, provato nel 1639 nel *Saggio sulle coniche*. Il teorema di Pascal afferma che in un esagono inscritto in una conica i lati opposti si incontrano in punti che sono collineari (*si veda la figura 9*). Il teorema di Pappo è il caso speciale quando la conica è degenere e si riduce a due rette, e i lati opposti sono paralleli e si incontrano all'infinito (*si veda la figura 10*). Il teorema viene usato per dimostrare la commutatività e l'associatività del prodotto di segmenti. E il prodotto, a sua volta, è definito geometricamente rispetto a due assi cartesiani in base alle teoria delle proporzioni, sfruttando il fatto che un prodotto sta a uno degli addendi come l'altro degli addendi sta all'unità (*si veda la figura 11*).

La chiarificazione del ruolo del teorema di Pappo negli *Elementi* di Euclide è data da due teoremi di Hilbert, che dimostrano rispettivamente che esso è equivalente sia alle Proposizioni I.37 e I.39, cioè al fatto che triangoli con la stessa base sono equicomplementabili se e solo se hanno la stessa altezza, sia alle Proposizioni VI.4 e VI.5, cioè al fatto che due triangoli sono simili se e solo se hanno i lati corrispondenti proporzionali.

A proposito della Proposizione VI.4, cioè del fatto che due triangoli simili hanno lati corrispondenti proporzionali, l'abbiamo già usata per affermare l'indipendenza della definizione di

L'AUTORE

PIERGIORGIO ODIFREDDI insegna logica matematica all'Università di Torino e alla Cornell University di Ithaca (nello Stato di New York), e collabora a «la Repubblica» e «L'Espresso». Tra i suoi libri divulgativi di matematica: «La matematica del Novecento» (Einaudi, Torino, 2000), «Il diavolo in cattedra» (Einaudi, Torino, 2003) e «Divertimento geometrico» (Bollati Boringhieri, Torino, 2003).

area di un triangolo dalla base scelta. E il suo ruolo centrale è confermato da un ulteriore teorema di Hilbert, che dimostra che essa è equivalente all'*esistenza* di una misura di area per i poligoni, cioè di una funzione che assegni aree uguali a triangoli uguali, e che sia additiva.

Quanto all'*unicità* della misura, la si può ottenere in vari modi, tutti già noti fin dal Papiro di Rhind: per esempio, definendo l'area di un triangolo come «base per altezza diviso due»; o quella di un rettangolo come «base per altezza»; o quella di un quadrato come «lato per lato». Se invece ci si limita a definire l'area di un quadrato di lato unitario come «uno», allora si misurano tutti e soli i poligoni di area razionale. Per misurare anche quelli di area irrazionale è necessario aggiungere la condizione che la funzione di misura sia anche monotona rispetto all'inclusione, come d'altronde è necessario fare anche per estendere la misura dai poligoni alle figure qualunque, a partire dal cerchio.

Assiomi vecchi e nuovi

Una seconda serie di problemi degli *Elementi* riguarda le assunzioni necessarie per la validità del teorema di Pitagora, a partire dal quinto postulato, che interviene sia direttamente che indirettamente nella dimostrazione di Euclide: in particolare, nella costruzione dei quadrati sui tre lati, e nella Proposizione I.35 relativa all'uguaglianza dell'area di parallelogrammi aventi la stessa base e la stessa altezza (attraverso il fatto, usato per poter applicare il criterio LAL, che gli angoli corrispondenti formati da due rette parallele tagliate da una trasversale sono uguali).

Ora, come scoprirono Gerolamo Saccheri e Adrien Marie Legendre nel Settecento, nel loro protostudio della geometria iperbolica, il postulato delle parallele non solo permette la costruzione di un quadrato, ma è *equivalente* all'esistenza di un quadrato (o, più in generale, di un rettangolo)! Senza questo postulato, dunque, il teorema di Pitagora non solo non si può dimostrare, ma non si può neppure enunciare nella versione geometrica, che fa appunto riferimento ai quadrati *costruiti sui* lati di un triangolo retto.

Si potrebbe pensare di aggirare la questione enunciando il teorema di Pitagora in versione algebrica, riferendosi cioè ai quadrati *dei* lati di un triangolo retto, e dimostrandolo mediante la teoria delle proporzioni, come abbiamo fatto agli inizi. Ma anche questa volta il postulato delle parallele non solo permette di dimostrare il teorema, ma è equivalente a esso!

Il teorema di Pitagora è dunque caratteristico della geometria euclidea, e non può essere dimostrato senza il postulato delle parallele. E neppure senza il criterio LAL, che Euclide cercò invano di provare come Proposizione I.4, mediante un inconcludente argomento per sovrapposizione mediante moto rigido, ma che a partire da Hilbert viene invece esplicitamente assunto come assioma, e permette appunto di giustificare il moto rigido. Per mostrare il legame necessario fra il criterio LAL e il teorema di Pitagora basta esibire un modello della geometria euclidea in cui entrambi falliscono, mentre tutti i rimanenti assiomi sono soddisfatti.

Il più semplice è la cosiddetta *geometria del taxi*, introdotta da Karl Menger e ripresa da Hermann Minkowski, in cui la distanza fra due punti viene calcolata non in linea d'aria, ma sommando le distanze orizzontali e verticali, come fa appunto il contachilometri in una città con le strade a scacchiera. In questa singolare geometria un quadrato euclideo può diventare un cerchio; un triangolo retto isoscele può risultare equilatero, non avere gli angoli alla base uguali, e avere diversi prodotti «base per altezza»; e sia il criterio LAL che il teorema di Pitagora falliscono (*si veda la figura 12*).

Altrettanto singolare è la *geometria della rifrazione*, introdotta da Forest Moulton, in cui le rette con coefficiente angolare positivo vengono rifratte di metà coefficiente, quando passano attraverso l'asse Y. Questa volta, oltre al criterio LAL, fallisce anche il teorema di Pappo (*si veda la figura 13*), e dunque cadono entrambe le teorie dell'area e delle proporzioni. L'apparentemente innocuo criterio LAL risulta dunque essere cruciale per il trattamento non solo del teorema di Pitagora, ma anche degli strumenti usati per le sue varie dimostrazioni, da cui avevano preso le mosse sia la geometria greca che, più modestamente, le nostre variazioni sul suo tema più famoso: il teorema di Pitagora.

LO SVILUPPO DI ORGANISMI COMPLESSI è inestricabilmente legato alla capacità delle singole cellule che li compongono di autoeliminarsi in base alle esigenze di strutturazione dell'organismo stesso. Il fenomeno è chiaramente visibile nel feto, in cui la morte cellulare programmata «scolpisce» le forme interne ed esterne eliminando, per esempio, le membrane che inizialmente uniscono le dita.

Neil Bromhall/Genesis Film/SPL/Grazia Neri

Morire per vivere

La complessità del vivente dipende dal fragile equilibrio fra fenomeni di ricostruzione e di eliminazione. E la capacità delle cellule di autodistruggersi è antica quanto la vita stessa

di Jean-Claude Ameisen

Apparsa sulla Terra circa quattro miliardi di anni fa, la vita continua a evolversi sul nostro pianeta senza interruzione, generando in continuazione una profusione di novità. Fino a oggi, ciò che noi chiamiamo «vita» non è mai scomparso, non è mai morto. E tuttavia questo viaggio straordinario attraverso il tempo si è svolto su uno sfondo di catastrofi e di ecatombi che hanno portato all'estinzione più del 99 per cento delle specie che sono apparse sulla Terra.

La straordinaria continuità del vivente si rivela come una sequenza di mondi che finiscono, alcuni dei quali sono riusciti, prima di sparire, a generare mondi nuovi. Alla nostra scala temporale, che va dal concepimento all'infanzia, alla maturità e infine alla vecchiaia, il nostro universo, singolo ed effimero, si costruisce, e poi torna a decomporsi, lungo una sequenza di metamorfosi che ci avvicinano, a poco a poco, all'istante della nostra morte.

Qual è la natura delle relazioni esistenti fra la vita e la morte? Per tentare di rispondere a questa domanda, proveremo ad adottare una nuova prospettiva. Come tutti gli esseri viventi che ci circondano, dagli organismi più semplici a quelli più complessi, ognuno di noi è composto da cellule, le più piccole entità autonome del vivente, capaci di attingere le loro risorse dall'ambiente, di avere un'esistenza stabile e riprodursi. Fin dalle sue origini, il vivente si è propagato nel tempo in forma di cellule. Noi nasciamo da un'unica cellula – la cellula uovo – nata a sua volta dalla fusione di due cellule, e ci trasformiamo progressivamente in una nebulosa viva, formata da decine di migliaia di miliardi di cellule. Per questa ragione, ogni domanda sulla vita e sulla morte – sulla nostra vita e la nostra morte – ci rimanda a un interrogativo sulla vita e la morte delle cellule di cui siamo fatti.

Noi siamo, in ogni momento, in parte **sul punto di morire e in parte sul punto di rinascere**

Per molto tempo si è pensato che la morte delle nostre cellule potesse essere causata solo da traumi e incidenti, da un'incapacità intrinseca a resistere all'usura, al passare del tempo e alle aggressioni dell'ambiente. Dalle ricerche più recenti emerge invece il concetto controintuitivo che tutte le nostre cellule abbiano in permanenza la facoltà di scatenare la propria autodistruzione, la propria morte prematura. Partendo da informazioni contenute nei loro geni, le nostre cellule producono gli «esecutori» del suicidio, che possono decretarne la fine, e i «protettori», capaci per qualche tempo di neutralizzare gli esecutori. Anzi, la sopravvivenza stessa di ogni cellula dipende, giorno dopo giorno, dalla natura dei legami provvisori che essa è in grado di stringere con le altre cellule dell'organismo, e che, soli, le permettono di reprimere l'avvio della propria autodistruzione.

La morte al cuore del vivente

Queste scoperte cominciano a modificare il nostro stesso concetto di «vita», almeno a livello cellulare. Concepita finora come un fenomeno esclusivamente positivo, la vita sembra invece il prodotto della continua repressione di un evento negativo, l'autodistruzione. Percepita come un fenomeno individuale, sembra avere continuamente bisogno della presenza degli altri, ed essere quindi un evento collettivo. Noi siamo «società cellulari», in cui ciascun componente vive in una condizione di continuo «rinvio», e nessuno può vivere da solo. Da questa precarietà e dall'interdipendenza che fa nascere dipende la nostra esistenza come individui. Ma se la collettività è necessaria alla sopravvivenza di ogni cellula, non è sufficiente. La scomparsa prematura di un gran numero di cellule ha un ruolo fondamentale nella perenne ricostruzione del nostro corpo: all'immagine antica della morte che giunge dall'esterno, come una sinistra falciatrice, si è sovrapposta, almeno a livello cellulare, l'immagine di uno scultore che opera nel cuore del vivente, uno scultore a cui tutto ciò che è vivo deve l'emergere della propria forma e complessità.

Fin dai primi giorni dopo il concepimento, il suicidio cellulare (o apoptosi, in gergo tecnico) partecipa alle continue metamorfosi della nostra forma in divenire. La morte cellulare scolpisce la forma interna ed esterna, quella delle braccia e delle gambe. E poi, eliminando i tessuti che separano le dita, quella delle mani. La morte fa sparire gli abbozzi degli organi genitali del sesso opposto, inizialmente compresenti. Negli abbozzi del cervello e del sistema immunitario, la morte cellulare è parte integrante di un processo di auto-organizzazione il cui punto d'arrivo non è la scultura di una forma, bensì della nostra memoria e della nostra identità. Dopo la nascita, e per tutta la nostra esistenza, le cellule continuano a produrre, a partire dalle informazioni contenute nei geni, le armi che potrebbero condurle in qualsiasi momento sul cammino dell'autodistruzione. Il nostro corpo, prima di vello), ridestandosi all'improvviso per dar vita a nuove cellule quando quelle circostanti si autodistruggono e spariscono.

A questa complessità corrisponde tuttavia anche una vulnerabilità che ha iniziato a rivelarsi da poco più di una decina di anni. Neoplasie, malattie degenerative del cervello, crisi cardiache, AIDS, malattie autoimmuni, epatiti, incidenti vascolari cerebrali – la maggior parte delle malattie, insomma – sono legati, almeno in parte, a malfunzionamenti del suicidio cellulare. Via via tutti i settori della biologia e della medicina vengono reinterpretati in questa nuova chiave di lettura. Siamo, cioè, alle soglie di una rivoluzione delle concezioni terapeutiche.

IN SINTESI

- Tutte le nostre cellule hanno la facoltà di scatenare la propria autodistruzione: sotto il controllo dei geni, producono alcune sostanze che possono decretarne la fine, e altre in grado di posticiparla.
- Ciò che è programmato non è tanto il destino individuale delle cellule, quanto la capacità di avviare o reprimere l'autodistruzione, in funzione delle interazioni passate e presenti con l'ambiente.
- In realtà, è proprio l'autodistruzione cellulare – nata in un remoto passato, forse dalla lotta per la vita fra organismi unicellulari e virus – a «scolpire» oggi la forma dei corpi viventi, e perfino le forme di società costruite dagli organismi più semplici.

bambini e poi di adulti, è come un fiume che si rinnova di continuo. Il nostro senso di stabilità è in parte illusorio: ogni giorno varie decine di miliardi di cellule si autodistruggono e vengono sostituite da cellule nuove. Noi siamo, in ogni momento, in parte sul punto di morire e in parte di rinascere. E ciò che permane più a lungo è fragile quanto quello che scompare e rinasce ogni giorno.

Questa precarietà, questo perenne rinvio, svolge un ruolo essenziale nella nostra plasticità e complessità, poiché consente all'organismo di plasmarsi, ricomporsi, adattarsi a un ambiente in perpetuo mutamento. È l'attuazione del suicidio cellulare a evitare, di norma, che il nostro sistema immunitario aggredisca il nostro stesso corpo, e che una cellula che ha subito alterazioni genetiche imbocchi la strada che conduce al cancro.

Inizia così a emergere una visione più dinamica. La continuità dipende da un permanente equilibrio fra le capacità di eliminazione e ricostruzione, di autodistruzione e rinnovamento. Siamo in presenza di un altro aspetto affascinante del vivente: la capacità di alcune cellule (quelle staminali) di dare origine alla giovinezza e alla diversità. Queste cellule sonnecchiano per tutta la vita nella maggior parte degli organi (compreso il cer-

L'efficacia di questi nuovi concetti e la ricchezza delle loro implicazioni hanno favorito lo sviluppo di un linguaggio scientifico ricco di metafore antropomorfiche e impregnato di nozioni finalistiche, dove abbondano espressioni come «suicidio cellulare», «morte programmata», «altruismo cellulare», «decisione» di vivere o di morire: espressioni che, se da un lato esprimono il fascino esercitato da questo fenomeno, dall'altro evidenziano la difficoltà di percepirne la vera natura.

Genesi dell'autodistruzione

«Non si può fare scienza senza usare un linguaggio ricco di metafore» ha scritto il genetista Richard Lewontin, aggiungendo però che «il prezzo da pagare è una continua vigilanza». In biologia la nozione stessa di programma (etimologicamente: «ciò che è scritto in anticipo») favorisce una confusione fra l'esistenza di informazioni genetiche che permettono certe realizzazioni e il modo in cui le cellule – e gli organismi – utilizzano queste informazioni. Quel che è programmato non è il destino individuale delle cellule, bensì la loro capacità di avviare o reprimere l'autodistruzione, in funzione delle interazioni passate e presenti con il loro ambiente. Quanto alla nozione di suicidio cellulare è anch'essa ambigua, poiché facilita la confusione fra l'atto di uccidersi (che la cellula realizza concretamente utilizzando gli esecutori di cui è dotata) e la «decisione» di farlo (che dipende dalla natura delle interazioni della cellula con la collettività che la circonda, e non dalla cellula stessa). Se vogliamo comprendere la ragion d'essere di una proprietà apparentemente misteriosa delle nostre cellule, spesso è meglio non interrogarsi sulla natura del suo «ruolo» apparente – della sua «utilità», di ciò a cui sembra servire adesso – ma andare alla ricerca delle sue origini.

LA MORTE CELLULARE si svolge in tre fasi: all'inizio si ha picnosi, una contrazione della cellula, seguita da frammentazione e, infine, da fagocitosi da parte delle altre cellule del tessuto. Alla fine, della cellula iniziale non resta alcuna traccia. In basso, un leucocita in fase di apoptosi (*sopra*) e uno normale in una microfotografia elettronica a scansione.

Giorgia Roversi

Gopal Murti/SPL/Grazia Neri

Quando, nel corso dell'evoluzione del vivente, è emersa nelle cellule questa paradossale potenzialità di autodistruggersi? C'è stata un'epoca in cui la morte veniva solo dall'esterno, da incidenti e aggressioni casuali dell'ambiente? In quale momento la capacità di autodistruggersi, di attivare la morte dall'interno, è diventata una proprietà intrinseca del vivente?

Oggi sappiamo che l'autodistruzione cellulare scolpisce la forma del corpo di animali e piante i cui capostipiti sono apparsi circa un miliardo di anni fa. E scolpisce anche la complessità delle innumerevoli forme di società costruite dagli organismi più semplici; quindi non solo degli eucarioti unicellulari, gli antenati degli animali e delle piante apparsi circa due miliardi di anni fa, ma anche dei batteri, che regnano sulla Terra da circa quattro miliardi di anni. Il potere di autodistruggersi sembra profondamente radicato nel vivente, e senza dubbio le sue origini non hanno alcun rapporto col ruolo che esso sembra avere oggi nel nostro corpo. In molti batteri, i meccanismi che controllano la morte alterano la maggior parte dei confini concettuali che siamo abituati a tracciare fra la morte «dall'interno» e «dall'esterno», fra «altruismo» ed «egoismo», fra cooperazione e competizione, fra infezione e simbiosi, e forse anche fra organismi unicellulari e pluricellulari.

Può darsi che le attuali relazioni fra i batteri e i virus (o i plasmidi) che li colonizzano illustrino il modo in cui la lotta fra i microrganismi infettivi e i loro ospiti abbia dato origine ai precursori dei programmi di suicidio cellulare. La maggior parte dei plasmidi ha moduli genetici di «dipendenza», che comportano la fabbricazione, da parte del batterio infettato, di una tossina (un esecutore) dotata di grande stabilità, e di un antidoto (un protettore) che, degradandosi rapidamente, non è in grado di neutralizzare durevolmente la tossina se non viene rifabbricato di conti-

Gianni Dagli Orti/Corbis/Contrasto

nuo dal batterio, in dipendenza dai geni del plasmide. Così il batterio infettato diventa una collettività la cui sopravvivenza dipende dalla preservazione dell'unica entità, il plasmide, che permette alla cellula di reprimere la propria autodistruzione.

Certi batteri hanno moduli genetici di dipendenza isolati, che non sono (o non sono più) associati a un plasmide. Quel che provoca l'arresto dell'utilizzazione da parte del batterio del suo modulo di dipendenza e, di conseguenza, la sparizione dell'antidoto, la liberazione della tossina e la morte dall'interno, è la percezione da parte del batterio di un ambiente sfavorevole, per esempio una diminuzione delle risorse energetiche. Di fronte a un'incombente carestia, lo scatenamento di un'autodistruzione prematura in una parte della colonia favorirà la sopravvivenza della parte restante, che disporrà di una risorsa supplementare, i batteri che si saranno autodistrutti. I progenitori degli esecutori e dei protettori che partecipano oggi al controllo dei programmi apparentemente altruistici di suicidio cellulare apparvero quindi forse durante le lotte egoistiche combattute nella notte dei tempi fra i predatori (i plasmidi) e le prede (i batteri).

Ogni cellula – dalla più semplice alla più complessa – è un misto di elementi eterogenei di varia origine, una coabitazione di differenze la cui perpetuazione potrebbe spesso aver avuto come unica alternativa solo la morte. I batteri e i loro moduli di dipendenza di origine plasmidica, come pure le cellule eucariote e i loro mitocondri di origine batterica, ne rappresentano alcuni esempi. È forse al ritmo di queste simbiosi – di questi episodi spesso irreversibili di fusione di alterità in nuove identità – che si sono propagati e diversificati i successivi intrecci di esecutori e protettori che controllano oggi la vita e la morte delle cellule.

COME IN QUESTA DANZA MACABRA, la morte è strettamente intrecciata alla vita. Ognuna delle nostre cellule vive differendo la propria morte, e nessuna può vivere da sola. Nel corso della loro danza le nostre cellule stabiliscono legami con i loro partner. In funzione di questi legami sopravvivono o avviano la loro autodistruzione. Qui sotto, il biologo molecolare britannico Andrew Wyllie, che nel 1972 usò per primo il termine «apoptosi» per indicare il «suicidio» delle cellule tumorali.

James King-Holmes/SPL/Grazia Neri

L'origine del potere di autodistruggersi è forse ancora più antica, e le tossine e gli antidoti dei moduli di dipendenza dei plasmidi non sarebbero altro che variazioni estreme su un tema che risale alla nascita stessa del vivente. Ho avanzato l'ipotesi («del peccato originale») che il potere di autodistruggersi sarebbe stato, fin dall'inizio, una conseguenza ineluttabile del potere di auto-organizzazione che caratterizza la vita. Vivere, costruirsi e riprodursi significa utilizzare in permanenza utensili molecolari che rischiano in ogni momento di provocare la morte, pur potendo anche reprimerla.

A che punto siamo oggi? Gli esecutori e i protettori che controllano la vita e la morte delle cellule verrebbero semplicemente reclutati fra gli innumerevoli attori della vita cellulare? Alcune recenti ricerche suggeriscono che potrebbe effettivamente essere così. In effetti, l'attivazione della maggior parte degli esecutori non conduce obbligatoriamente alla morte, ma può svolgere al contrario un ruolo importante nel metabolismo, nel differenziamento e nella riproduzione delle cellule.

Così, paradossalmente, dopo più di vent'anni di ricerca di un programma genetico specifico la cui unica funzione fosse la morte, la nozione stessa di «geni della morte» potrebbe risultare un'illusione, e i «programmi di morte» solo una delle molteplici possibilità di utilizzazione del programma di vita. Noi cominciamo solo ora a distinguere, nella lunga storia dell'evoluzione del vivente, il groviglio e l'intercambiabilità dei meccanismi molecolari che partecipano alla vita e alla morte.

Queste antiche relazioni che la vita intrattiene con la morte prematura, prodotta dall'interno, potrebbero essere all'opera anche nel determinare la nostra longevità? L'invecchiamento – questa ultima frontiera fra la salute e la malattia – è dovuto unicamente a un'usura inevitabile e a un progressivo accumulo di errori nel corso del tempo? Oppure la nostra morte, come la morte delle cellule che compongono il nostro organismo, potrebbe procedere da una forma di autodistruzione?

Le frontiere apparentemente invalicabili della massima longevità naturale hanno cominciato a rivelare, in alcune specie animali, una grande plasticità. E l'aumento della longevità causato da alterazioni in certi geni o nell'ambiente non si traduce in un aumento della durata della vecchiaia, bensì in un prolungamento della giovinezza e della fecondità. Le frontiere della longevità sembrano essere state scolpite in modo contingente dai successivi confronti, di generazione in generazione, fra gli individui e il loro ambiente. Esse appaiono come punti di equilibrio, forme di compromesso fra conflitti che si scatenano, all'interno stesso del corpo, fra fenomeni che favoriscono la persistenza degli individui e fenomeni che ne abbreviano la vita, ma ne favoriscono lo sviluppo e la capacità di generare una discendenza.

Qual è l'origine dell'invecchiamento? Per molto tempo la senescenza – a livello del corpo come delle cellule che lo compongono – è stata considerata un prezzo pagato dal vivente, un miliardo di anni fa, per l'emergere della complessità, ossia per l'emergere dei primi corpi pluricellulari di animali e piante. Oggi sappiamo però che una forma inevitabile d'invecchiamento è all'opera in organismi unicellulari ancestrali come i lieviti e almeno un genere batterico, il *Caulobacter*, e che l'origine dell'invecchiamento cellulare è probabilmente altrettanto antica dell'autodistruzione cellulare.

La paradossale vecchiaia della giovinezza

In alcuni lieviti – dove la cellula madre si distingue perché è più grande delle cellule figlie che stanno nascendo – ciascuna cellula procrea un numero limitato di «figlie». Dopo di che invecchia, diventa sterile e scompare. La capacità di riprodursi, potenzialmente illimitata, di una colonia di lieviti non dipende quindi da un'eterna giovinezza di ognuna delle cellule che la compongono, bensì da successive procreazioni di cellule effimere. A mano a mano che ogni cellula ne genera una nuova, non divide in modo uguale e simmetrico metà dei suoi componenti con le figlie, ma conserva certi componenti – equivalenti agli esecutori – il cui accumulo progressivo determina il suo invecchiamento, la sua sterilità e poi la sua morte. In questo contesto, i concetti di invecchiamento e di autodistruzione delle cellule sembrano congiungersi.

Le cellule madri si sacrificano a vantaggio della sopravvivenza delle figlie, oppure sono le cellule figlie a costringere la cellula madre a conservare al suo interno le molecole che ne affretteranno la fine? Evitiamo la tentazione di indulgere in termini e concetti antropomorfici, come altruismo ed egoismo, cooperazione e lotta, in cui affiorano le nozioni di interesse, coscienza e intenzionalità. L'importante è rendersi conto che la sparizione prematura di una delle due cellule, la cellula madre, è probabilmente uno dei meccanismi fondamentali di rottura di simmetria che hanno permesso un giorno, per caso – e continueranno a permettere – l'emergere di un fenomeno molecolare paradossale e ancora misterioso: la giovinezza. Questo fenomeno consente a ogni cellula figlia, che nasce sempre più vecchia della madre (tenendo conto dell'intera genealogia di varie centinaia di milioni o anche di vari miliardi di anni), di iniziare la sua esistenza con la stessa speranza di vita e la stessa fecondità di ognuna delle antenate, scomparse ormai da parecchio tempo.

Il progressivo invecchiamento di una cellula via via che genera altre cellule per qualche tempo più giovani e feconde; l'autodistruzione brutale di una parte delle cellule, che sfocia nella sopravvivenza del resto della collettività; l'invecchiamento di un corpo capace di generare corpi nuovi, per qualche tempo più giovani e fecondi: tutti questi fenomeni somigliano ad altrettante variazioni sullo stesso tema. Possiamo capire il comportamento delle nostre cellule e del nostro corpo, e tentare di modificarlo, se non ci rendiamo conto che ciò che ci fa invecchiare è forse ciò che in altri, prima di noi, ci ha permesso di nascere?

Quasi 150 anni fa Charles Darwin concludeva l'*Origine delle specie* con queste parole: «Così, dalla guerra della natura, dalla carestia e dalla morte, direttamente deriva il più alto risultato che si possa concepire, cioè la produzione degli animali superiori. Vi è qualcosa di grandioso in questa concezione della vita...» (trad. L. Fratini, Boringhieri, 1967). C'è senza dubbio qualcosa di grandioso anche nell'idea che l'emergere, all'interno stesso del vivente, di una forma controllata di eliminazione prematura, abbia potuto paradossalmente contribuire alla capacità di resistere, in una lotta persa *a priori*, all'usura e alle aggressioni dell'ambiente. Dobbiamo ormai tentare di misurare fino a che punto questa forma cieca, contingente e sempre più complessa di gioco con la morte abbia potuto essere un determinante essenziale del viaggio che il vivente ha compiuto attraverso il tempo.

Le cellule madre si sacrificano a vantaggio **della sopravvivenza delle cellule figlie?**

L'AUTORE

JEAN-CLAUDE AMEISEN, insegna immunologia all'Università di Parigi 7, CHU Bichat, ed è presidente del Comitato di etica dell'Istituto nazionale per la sanità e la ricerca medica (INSERM). È autore del volume *Al cuore della vita. Il suicidio cellulare e la morte creatrice*, Feltrinelli, Milano, 2001.

PER APPROFONDIRE

GUARENTE L. e KENYON C., *Genetic Pathways that Regulate Aging in Model Organisms*, in «Nature», vol. 408, pp. 255-262, 2000.

AMEISEN J.-Cl., *On the Origin, Evolution and Nature of Programmed Cell Death: a Timeline of Four Billion Years*, in «Cell Death Differ», vol. 9, pp. 367-393, 2002.

HAYES F., *Toxins-antitoxins: Plasmid Maintenance, Programmed Cell Death and the Cycle Arrest*, in «Science», vol. 301, pp. 1496-1499, 2003.

AMEISEN J.-Cl., HERVIEU-LÉGER D. e HIRSCH R. (*a cura*), *Qu'est-ce que mourir?*, Le Pommier/Cité des Sciences et de l'Industrie, 2003.

di James Hansen

Riscaldamento globale:

una bomba da disinnescare

UN GIGANTESCO ICEBERG si stacca dal ghiacciaio San Rafael, in Cile. Fenomeni come questo, che si verificano in tutto il mondo, potrebbero causare un innalzamento di vari metri del livello dei mari, con conseguenze disastrose per l'ambiente e per le attività umane.

Ric Ergenbright/Corbis

Il surriscaldamento del pianeta è un fenomeno reale, ma si può ancora agire per rallentare il cambiamento del clima

Un paradosso implicito nell'idea di un riscaldamento globale provocato dall'uomo mi divenne improvvisamente chiaro in un pomeriggio d'estate del 1976, mentre mi trovavo a Jones Beach, a Long Island, assieme a mia moglie e a mio figlio. Ci eravamo sistemati vicino all'acqua per evitare la sabbia rovente, e nel tardo pomeriggio, quando il sole iniziò a tramontare, una brezza fredda si alzò dall'oceano formando bianchi frangenti di schiuma. Uno spettacolo così bello che mio figlio e io, incuranti della pelle d'oca, ci mettemmo a inseguire le onde, correndo lungo la riva. Quella stessa estate, Andy Lacis e io, con altri colleghi del Goddard Institute for Space Studies della NASA, avevamo stimato gli effetti dei gas serra sul clima. Già si sapeva che i gas serra prodotti dall'uomo, in particolar modo biossido di carbonio e clorofluorocarburi (CFC), si stavano accumulando nell'atmosfera. Questi gas rappresentano un *forcing* del clima, vale a dire uno sforzo ulteriore imposto al bilancio energetico del pianeta. Come una coperta, essi assorbono radiazione infrarossa (calore) che altrimenti sfuggirebbe dalla superficie terrestre e dall'atmosfera per disperdersi nello spazio.

Il nostro gruppo aveva calcolato che questi gas prodotti dalle attività umane stavano riscaldando la superficie della Terra in ragione di quasi due watt per metro quadrato. Poiché una lampadina come quelle che si usano per decorare gli alberi di Natale dissipa circa un watt, perlopiù in forma di calore, era come se gli esseri umani avessero messo un paio di lampadine su ogni metro quadrato della superficie terrestre, lasciandole accese notte e giorno. Il paradosso è tutto nel contrasto tra le immani forze della natura e le minuscole dimensioni delle lampadine. Quel tenue calore non dovrebbe bastare a mettere in moto il vento e le onde o far sparire la nostra pelle d'oca. Anche il loro impercettibile riscaldamento della superficie oceanica dovrebbe rapidamente disperdersi a grandi profondità, per cui sarebbero necessari molti anni, forse secoli, perché la superficie si riscaldi davvero.

Questo paradosso è stato ora in gran parte risolto con lo studio della storia del clima terrestre, che ha rivelato come forze di piccola entità, se agiscono per tempi sufficientemente lunghi, possono causare grandi cambiamenti climatici. E, coerentemente con le evidenze storiche, la Terra ha iniziato a riscaldarsi negli ultimi decenni al ritmo predetto dai modelli climatici che tengono conto dell'accumulo atmosferico di gas serra prodotti dall'uomo. Il riscaldamento sta avendo impatti notevoli: i ghiacciai si stanno ritirando in tutto il mondo; la coltre glaciale dei mari dell'Artico si è assottigliata; la primavera inizia con una settimana in anticipo rispetto a mezzo secolo fa.

Tuttavia molti interrogativi sono ancora senza risposta. In quale misura cambierà il clima nei decenni a venire? Quali saranno le conseguenze pratiche? Che cosa dovremmo, e che cosa potremmo, fare? Il dibattito intorno a queste domande è fortemente influenzato dagli interessi economici in gioco.

Un'analisi obiettiva del riscaldamento globale richiede una conoscenza quantitativa di tre fattori: la sensibilità del sistema climatico alle pressioni, l'entità del forcing che gli esseri umani stanno introducendo, e il tempo necessario perché il clima risponda. Tutti questi fattori possono essere studiati con modelli del clima globale, che sono simulazioni al computer. Ma la nostra più precisa conoscenza in merito alla sensibilità del clima è basata, almeno finora, sui dati empirici tratti dalla storia terrestre.

Le lezioni della storia

Negli ultimi milioni di anni il clima della Terra ha subito ripetute oscillazioni tra periodi di glaciazione e caldi periodi interglaciali. Una registrazione di 400.000 anni di temperature è conservata nella coltre glaciale antartica, che, a eccezione delle frange costiere, si è sottratta al disgelo anche nei periodi interglaciali più caldi. Questa registrazione (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*) suggerisce che l'attuale periodo interglaciale (l'Olocene), iniziato da circa 12.000 anni, sia prossimo alla fine.

Le millenarie oscillazioni climatiche naturali sono associate a lente variazioni dell'orbita terrestre indotte dalla gravità di altri pianeti, soprattutto Giove e Saturno (a causa della loro grande massa) e Venere (a causa della sua vicinanza). Queste perturbazioni influenzano pochissimo l'energia solare media annua che arriva sulla Terra, ma alterano la distribuzione geografica e stagionale dell'energia solare in arrivo, o insolazione, fino al 20 per cento. Le variazioni di insolazione, sul lungo periodo, condizionano l'accumulo e lo scioglimento dei ghiacci.

L'insolazione e i cambiamenti climatici condizionano anche l'assunzione e il rilascio di biossido di carbonio e metano da parte delle piante, del suolo e degli oceani. I climatologi stanno ancora elaborando una valutazione quantitativa dei meccanismi attraverso i quali gli oceani e le terre emerse rilasciano biossido di carbonio e metano via via che la Terra si riscalda, ma i dati paleoclimatici sono già una miniera di informazioni. La più preziosa delle quali è una misura empirica della sensibilità del clima.

La composizione dell'atmosfera dei periodi di glaciazione è nota con precisione grazie alle bolle d'aria intrappolata durante la formazione delle coltri glaciali dell'Antartide e della Groenlandia, nonché di molti ghiacciai di alta quota formati dall'accumulo di precipitazioni nevose. Inoltre, le distribuzioni geografiche delle coltri glaciali, della copertura vegetale e delle linee di costa durante i periodi di glaciazione sono ben mappate. Da questi dati sappiamo che il cambiamento di forcing climatico verificatosi tra il periodo glaciale e oggi è stato di circa 6,5 watt per metro quadrato. Esso corrisponde a un cambiamento di temperatura globale di cinque gradi Celsius, il che implica una sensibilità del clima di 0,75 ± 0,25 gradi Celsius per watt per metro quadrato. I modelli climatici forniscono una sensibilità del clima del tutto simile, ma il dato empirico è comunque più preciso e affidabile, poiché include tutti i processi che operano nel mondo reale, anche quelli che non siamo stati abbastanza bravi da includere nei modelli.

IN SINTESI

- Le conoscenze più precise di cui disponiamo sulla sensibilità del clima si basano su dati storici, i quali rivelano come forze anche piccole, ma che agiscono per tempi sufficientemente lunghi, possono causare grandi variazioni climatiche.
- Oggi le conseguenze dell'attività umana, come i gas serra, stanno avendo il sopravvento sui fattori naturali, e il pianeta ha iniziato a riscaldarsi a un ritmo predetto dai modelli climatici.
- La stabilità delle grandi coltri glaciali della Groenlandia e dell'Antartide e la salvaguardia delle linee di costa segnano il limite inferiore del riscaldamento globale, superato il quale saremo di fronte a un'«interferenza antropogenica pericolosa» con il clima.
- Per fermare il riscaldamento globale serve una cooperazione internazionale urgente e senza precedenti, ma gli interventi necessari sono fattibili e porteranno anche altri benefici per la salute umana, l'agricoltura e l'ambiente.

400.000 ANNI DI CAMBIAMENTI CLIMATICI

IL GHIACCIO DELL'ANTARTIDE ha conservato la testimonianza di 400.000 anni di temperature e livelli di biossido di carbonio e di metano nell'atmosfera. Gli scienziati studiano i gas intrappolati nelle bolle d'aria incapsulate nel ghiaccio, generalmente servendosi di carote di ghiaccio (*nella foto*) estratte dalla calotta glaciale e trasportate in laboratorio. La documentazione storica ci fornisce due dati cruciali: il confronto fra il periodo interglaciale attuale (l'Olocene) e la glaciazione più recente (20.000 anni fa) offre una misura accurata della sensibilità del clima ai fattori di forcing. La temperatura del precedente periodo interglaciale (l'Eemiano), quando il livello marino era parecchi metri superiore all'attuale, definisce una stima del riscaldamento che oggi verrebbe considerato una pericolosa interferenza antropogenica sul clima.

Jen Christiansen/Fonte: J. R. Petit e altri, in «Nature», Vol. 399, pp. 429-436, 3 giugno 1999 (*grafici*); Csiro/Simon Fraser/Photo Researchers, Inc. (*fotografie*)

I dati paleoclimatici offrono un'altra informazione importante. Le variazioni dell'orbita terrestre inducono il cambiamento climatico, ma operano alterando le proprietà dell'atmosfera e della superficie, e quindi l'equilibrio energetico planetario. Queste proprietà dell'atmosfera e della superficie oggi sono più influenzate dalle conseguenze dell'azione dell'uomo che dalle variazioni orbitali del pianeta.

Elementi di squilibrio

Il più grande cambiamento di forcing climatico nei secoli recenti è causato dai gas serra prodotti dalle attività umane. I gas serra nell'atmosfera assorbono radiazione anziché lasciarla disperdere nello spazio. Di fatto, essi rendono più spessa la proverbiale coperta, trattenendo al suolo più calore anziché lasciarlo sfuggire verso lo spazio. La Terra sta quindi irradiando verso lo spazio meno energia di quanta ne assorbe dal Sole. Questo temporaneo squilibrio energetico planetario provoca il graduale riscaldamento della Terra.

Data la grande capacità degli oceani di assorbire calore, alla Terra occorre circa un secolo per raggiungere un nuovo equilibrio, vale a dire per tornare a ricevere dal Sole la stessa quantità di energia che irradia nello spazio. E naturalmente l'equilibrio viene ripristinato a una temperatura più alta. Nel frattempo, prima che questo nuovo equilibrio venga raggiunto, possono aggiungersi altri fattori di forcing.

Il più importante dei gas serra generati dall'uomo è il biossido di carbonio, che proviene principalmente dal consumo di combustibili fossili (carbone, petrolio e gas). Tuttavia l'effetto combinato degli altri gas prodotti dall'uomo è confrontabile con quello del biossido di carbonio. Questi altri gas, in particolar modo l'ozono troposferico e i suoi precursori, compreso il metano, sono ingredienti dello smog che danneggia la salute umana e la produttività agricola.

L'altro fattore principale di forcing del clima dovuto alle attività umane sono gli aerosol (minute particelle presenti nell'aria). Il loro effetto è più complesso. Alcuni aerosol «bianchi», come i solfati che derivano dallo zolfo presente nei combustibili fossili, sono altamente riflettenti, e quindi riducono il riscaldamento solare della Terra; d'altro canto la fuliggine, un prodotto della combustione incompleta dei combustibili fossili, dei biocombustibili e della combustione di biomassa all'aria aperta, assorbe luce solare, e quindi riscalda dell'atmosfera. Perciò l'incertezza sull'impatto climatico degli aerosol è almeno del 50 per cento, in parte perché le quantità di queste polveri finissime non sono ben misurate e in parte a causa della loro complessità.

Gli aerosol causano anche un forcing indiretto alterando le proprietà delle nuvole, che diventano più chiare e tendono a durare di più, riducendo la quantità di luce solare assorbita dalla Terra, cosicché l'effetto indiretto degli aerosol è un forcing negativo che causa raffreddamento. Un'altra alterazione del clima ascrivibile all'uomo è dovuta alla sostituzione delle foreste con terreni agricoli. Le foreste sono scure anche quando il suolo è coperto da neve: il disboscamento comporta quindi una riduzione del riscaldamento solare.

Forcing naturali come le eruzioni vulcaniche e le fluttuazioni dell'irraggiamento solare probabilmente hanno scarse variazioni, in un arco di tempo di mille anni. Ma i dati che indicano un

I GAS SERRA PRODOTTI DALL'UOMO stanno riscaldando la superficie della Terra al tasso di quasi due watt per metro quadrato. L'effetto complessivo di questo riscaldamento è rallentato dagli oceani, in grado di assorbire il calore in eccesso. La superficie dell'oceano inizia a riscaldarsi, ma lo fa con lentezza, poiché le acque superficiali vengono mescolate e sostituite da acqua più fredda proveniente dal basso. Secondo i ricercatori ci vorrà un secolo perché gli oceani raggiungano la loro nuova temperatura.

Randy Harris

piccolo aumento dell'irraggiamento solare negli ultimi 150 anni comportano un'ulteriore pressione climatica di qualche decimo di watt per metro quadrato.

Il valore netto dei forcing aggiunti dal 1850 è 1,6 ± 1,0 watt per metro quadrato. Nonostante le grandi incertezze, ci sono diverse prove sulla correttezza di questa stima. Una di esse è la concordanza fra la temperatura globale osservata durante gli ultimi decenni e i modelli climatici condizionati da questi forcing. Inoltre, l'incremento di calore degli oceani osservato negli ultimi cinque decenni è coerente con la stima del forcing climatico netto.

Caldo globale

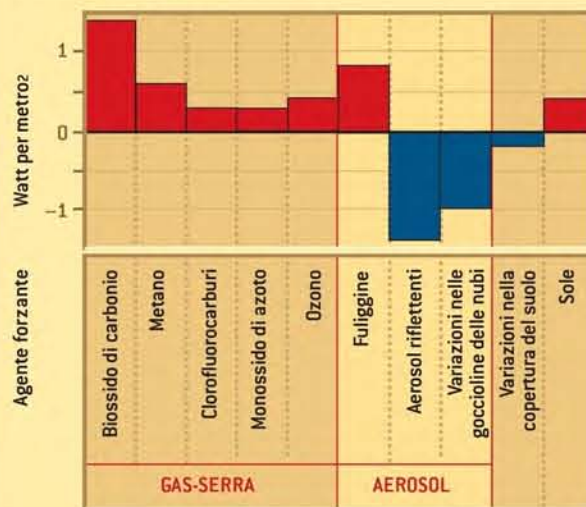
La temperatura superficiale media della Terra è aumentata di circa 0,75 gradi da quando, alla fine dell'Ottocento, si è cominciato a raccogliere misure regolari e approfondite. La parte più consistente del riscaldamento (circa 0,5 gradi) si è però verificata dopo il 1950, quando, grazie al miglioramento delle apparecchiature e alle osservazioni da satellite dell'attività solare, dell'ozono e degli aerosol stratosferici, è stato anche possibile studiarne meglio le cause. Anche il 70 per cento dell'incremento di gas serra risale alla seconda metà del XX secolo.

Il parametro quantitativo più importante è lo squilibrio energetico planetario (*vedi finestra a pagina 74*), che è una conseguenza dei tempi lunghi necessari all'oceano per riscaldarsi. La conclusione a cui siamo giunti attraverso le nostre ricerche è che attualmente la Terra ha uno squilibrio compreso tra 0,5 e 1 watt per metro quadrato, che rappresenta la differenza in eccesso tra la quantità di radiazione solare assorbita dal pianeta rispetto a quella emessa sotto forma di calore verso lo spazio. Anche se la composizione atmosferica non dovesse cambiare ulteriormente, la superficie terrestre finirebbe comunque con il riscaldarsi di altri 0,4-0,7 gradi.

La maggior parte dello squilibrio energetico è costituita dal calore assorbito dall'oceano. Sydney Levitus della National Oceanic and Atmospheric Administration ha analizzato le variazioni della temperatura oceanica degli ultimi 50 anni, riscontrando che durante questo periodo di tempo il contenuto di calore degli oceani è aumentato di circa 10 watt-anno per metro quadrato. Levitus ha rilevato inoltre che il tasso di assorbimento termico dell'oceano degli ultimi anni è coerente con la stima di uno squilibrio energetico di 0,5-1 watt per metro quadrato. Va sottolineato che la quantità di calore necessaria per fondere i ghiacci tanto da innalzare di un metro il livello dei mari è pari a circa 12 watt-anno (media globale), cioè la quantità di energia che si accumulerebbe nell'arco di 12 anni se il pianeta fosse fuori equilibrio di un watt per metro quadrato.

L'accordo con le osservazioni, sia per il cambiamento di temperatura sia per l'immagazzinamento di calore da parte degli oceani immessi nei modelli, non lascia dubbi sul fatto che il cambiamento climatico globale osservato sia attualmente indotto da forcing naturali e antropogenici. L'attuale tasso di immagazzinamento di calore degli oceani è un parametro planetario critico: non solo determina l'entità del riscaldamento globale che ci aspetta, ma corrisponde anche alla riduzione delle forzature necessarie a stabilizzare il clima della Terra.

SQUILIBRI CLIMATICI

UN FORCING DEL CLIMA è un meccanismo che altera l'equilibrio energetico globale. Può trattarsi di un processo naturale – come, per esempio, le fluttuazioni dell'orbita terrestre – oppure artificiale, come l'emissione di aerosol e dei gas responsabili dell'effetto serra. Oggi i forcing del clima provocati dall'uomo predominano su quelli di origine naturale. L'impatto climatico più cospicuo è dovuto al biossido di carbonio, ma sommando tutti gli altri inquinanti atmosferici si ottiene un effetto equivalente. (Gli effetti degli aerosol non sono noti con esattezza.)

Jen Christiansen/Fonte: James Hansen

Una bomba da disinnescare

L'obiettivo della United Nations Framework Convention on Climate Change, approvata a Rio de Janeiro nel 1989, è di stabilizzare la composizione atmosferica «per prevenire una pericolosa interferenza antropogenica con il sistema climatico» attraverso interventi che non sconvolgano l'economia globale. Definire il livello di riscaldamento che costituisce «interferenza antropogenica pericolosa» è quindi un fattore cruciale della questione. Le Nazioni Unite hanno incaricato dell'analisi del riscaldamento globale l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), che ha definito degli scenari di forcing climatico, li ha usati per simulazioni del clima del XXI secolo e ha stimato l'impatto dei cambiamenti delle temperature e delle precipitazioni sull'agricoltura e gli ecosistemi naturali. Secondo l'IPCC, se il riscaldamento globale sarà di vari gradi, entro un secolo il livello dei mari aumenterà di alcune decine di centimetri. Un aumento, secondo i calcoli del gruppo, dovuto principalmente all'espansione termica dell'acqua, con una scarsa variazione del volume dei ghiacci.

Questi effetti climatici moderati, anche in presenza di un rapido incremento dei gas serra, danno l'impressione che non siamo prossimi a un'interferenza antropogenica pericolosa. Personalmente, però, credo che vi siamo assai più vicini di quanto non si pensi, e che si debba porre l'accento sulla riduzione dei cambiamenti, anziché sull'adattarsi a essi. A mio parere, il problema dominante del riscaldamento globale è il cambiamento del livello del mare e la velocità con cui possono disintegrarsi i ghiacci. Gran parte della popolazione mondiale vive in regioni costiere, e il valore delle infrastrutture costruite in queste aree è quasi incalcolabile. La necessità di tutelare le attuali linee di costa pone un limite preciso al livello di riscaldamento che costituisce un'interferenza antropogenica pericolosa.

La storia del pianeta e l'attuale squilibrio energetico indotto dall'uomo disegnano un quadro inquietante delle prospettive di cambiamento del livello dei mari. I dati sulle temperature in Antartide mostrano che il riscaldamento degli ultimi 50 anni ha riportato la temperatura globale quasi ai livelli massimi dell'attuale era interglaciale. Ed è già in corso un ulteriore aumento, che ci porterà a metà strada verso le temperature più alte dell'era interglaciale precedente (Eemiano), quando i livelli marini erano cinque o sei metri più alti di adesso. Un altro watt per metro quadrato di forcing che si aggiunga alle condizioni attuali porterebbe la temperatura globale grossomodo al massimo livello dell'Eemiano.

Il problema è: con quanta rapidità reagiranno al riscaldamento globale le coltri glaciali? L'IPCC calcola solo un leggero cambiamento nei ghiacci nell'arco di 100 anni; ma i calcoli del gruppo includono solo gli effetti graduali dei cambiamenti sulle precipitazioni nevose, l'evaporazione e lo scioglimento. Nel mondo reale, la distruzione delle coltri glaciali è provocata da processi e interazioni non lineari. La velocità massima del disgelo seguito all'ultimo periodo glaciale ha visto un tasso costante di scioglimento di oltre 14.000 chilometri cubi all'anno: circa un metro di aumento del livello del mare ogni 20 anni, per secoli e secoli di fila. Questo periodo di massima velocità di fusione coincide, per quel che è possibile calcolare, con la fase di riscaldamento più rapido.

Tenendo conto dei ritmi attuali di riscaldamento, si può prevedere che le zone caratterizzate da disgelo estivo e piogge si espanderanno su vaste aree della Groenlandia e frange dell'Antartide. L'innalzamento del livello marino, d'altro canto, tende a sollevare le piattaforme di ghiaccio marino che fanno da contrafforte ai ghiacci terrestri: questi, senza più freno, accelerano il loro movimento verso l'oceano. E una volta che una coltre glaciale inizia a collassare la sua fine può essere estremamente rapida.

Lievi perturbazioni, se durano abbastanza a lungo, possono causare **grandi cambiamenti** del clima

LO SQUILIBRIO ENERGETICO TERRESTRE

IL BILANCIO ENERGETICO DELLA TERRA è in equilibrio quando il calore emesso dal nostro pianeta è pari all'energia che ci arriva dal Sole. Attualmente, questo bilancio energetico non è in equilibrio (*si vedano il diagramma e la tabella qui sotto*). Gli aerosol prodotti dall'uomo hanno aumentato la quota di luce solare che viene riflessa dalla Terra, ma questo effetto è più che compensato dall'intrappolamento della radiazione termica al suolo da parte dei gas-serra.
L'energia in eccesso – circa un watt per metro quadrato – riscalda gli oceani e provoca lo scioglimento dei ghiacci.
Le simulazioni dello squilibrio energetico planetario (*nel grafico*) sono confermate dalle misurazioni del calore immagazzinato negli oceani.
Lo squilibrio energetico della Terra è un valore critico, in quanto misura il forcing climatico netto e permette di prefigurare i cambiamenti globali in arrivo.

ENERGIA SOLARE TOTALE IN ARRIVO	340 W/m²
ENERGIA TOTALE EMESSA	339 W/m²
ENERGIA RIFLESSA (dall'atmosfera e dalla superficie) 100 W/m² a causa di processi naturali 1 W/m² a causa degli aerosol inquinanti	101 W/m²
CALORE IRRADIATO (dal suolo e dagli oceani) 240 W/m² a causa di processi naturali -2 W/m² a causa dei gas-serra inquinanti, che restituiscono calore alla superficie	238 W/m²
RISULTATO NETTO	1 W/m²
1 W/m² di energia in eccesso, che riscalda gli oceani e provoca la fusione di ghiacciai e calotte polari	

Jen Christiansen/Fonte: James Hansen

UN FIUME D'ACQUA SCENDE PER UN DECLIVIO attraverso un mulino glaciale in Groenlandia nell'estate del 2001. Il mulino, una voragine quasi verticale, trasporta l'acqua fino alla base della coltre glaciale, dove il fiume accelera il moto e la disintegrazione dei ghiacchi. L'accrescimento della coltre è un processo lento e «asciutto», legato alla quantità di precipitazioni nevose; la disintegrazione invece è un processo «umido», messo in moto da feedback positivi, e una volta avviato può concludersi in tempi velocissimi.

Lo squilibrio energetico planetario indotto dall'uomo mette a disposizione un'ampia scorta di energia per sciogliere i ghiacci. Una riserva di energia a cui si aggiunge l'aumentato assorbimento della luce solare da parte di coltri glaciali scurite dagli aerosol di fuligine, e dall'effetto di feedback positivo causato dal fatto che l'acqua disciolta rende più scura la superficie del ghiaccio.

Queste considerazioni non significano che dovremo aspettarci un grande cambiamento del livello dei mari nei prossimi anni. Perché si completino le condizioni per una dissoluzione accelerata delle coltri glaciali può essere necessario molto tempo: forse addirittura molti secoli. (Il satellite ICESat, recentemente messo in orbita dalla NASA, potrebbe rilevare segni precoci di un'accelerazione nel collasso della coltre glaciale.) Tuttavia, se lo squilibrio energetico planetario continua ad aumentare, sospetto che un innalzamento significativo del livello marino potrebbe cominciare molto prima. Mi sembra evidente che un riscaldamento globale che vada al di là di un certo limite renda inevitabile un'ampia variazione del livello dei mari nelle generazioni a venire. E una volta che il collasso dei ghiacci su vasta scala è cominciato, è impossibile arrestarlo. La costruzione di dighe potrebbe proteggere regioni circoscritte, come Manhattan o i Paesi Bassi, ma gran parte delle zone costiere del mondo verrebbe inondata.

La mia tesi è che il livello di influenza antropogenica definibile come «pericoloso» debba essere determinato in base alla temperatura globale e allo squilibrio di radiazione planetaria a seguito dei quali diventa praticamente impossibile evitare un disgelo di vaste proporzioni. Alla luce delle testimonianze paleoclimatiche, ritengo che il massimo livello tollerabile di aumento ulteriore del riscaldamento globale non debba superare un grado Celsius circa. Il che significa che il forcing climatico addizionale non dovrebbe superare il valore di un watt per metro quadrato.

Scenari di alterazione climatica

L'IPCC descrive vari scenari di forcing climatico per il XXI secolo, basati su diverse linee di tendenza della crescita demografica, dello sviluppo economico e delle fonti di energia. Secondo le stime del gruppo, nei prossimi 50 anni la pressione sul clima aumenterebbe di 1-3 watt per metro quadrato per il solo biossido di carbonio e di 2-4 watt per metro quadrato considerando anche gli altri gas serra e gli aerosol. Basandoci sul criterio appena esposto, anche il forcing minimo previsto dall'IPCC causerebbe quindi una pericolosa interferenza antropogenica con il sistema climatico.

Gli scenari elaborati dall'IPCC potrebbero, comunque, rivelarsi troppo pessimisti. In primo luogo, ignorano le riduzioni delle emissioni, alcune già in corso, indotte dal timore del riscaldamento globale. In secondo luogo, danno per scontato che l'inquinamento atmosferico continui a peggiorare, con livelli di ozono, metano e fuligine più alti nel 2050 che nel 2000. In terzo luogo, non tengono conto delle innovazioni tecnologiche che potrebbero ridurre le emissioni nei prossimi 50 anni. Un modo alternativo per delineare gli scenari consiste nell'esaminare le attuali tendenze degli agenti di forcing del clima, domandarsi come mai stiano cambiando nel modo che vediamo, e tentare di comprendere se esistano interventi ragionevoli per incoraggiare ulteriori cambiamenti nei tassi di crescita.

Il tasso di crescita dell'alterazione climatica dovuta ai gas serra ha raggiunto un massimo all'inizio degli anni ottanta, con quasi 0,5 watt per metro quadrato a decennio, ma è calato negli anni novanta a circa 0,3 watt per metro quadrato a decennio. La ragione principale di questo declino è nella riduzione delle emissioni di clorofluorocarburi, la cui produzione è stata messa al bando a causa del loro effetto distruttivo sull'ozono stratosferico.

Con i clorofluorocarburi in declino, i due più importanti gas serra restano il biossido di carbonio e il metano. Dopo l'ondata di aumento tra la fine della seconda guerra mondiale e la metà degli anni settanta, il tasso di crescita del biossido di carbonio si è quasi stabilizzato su una media di circa 1,6 parti per milione all'anno. Il tasso di crescita del metano è diminuito drasticamente, di almeno due terzi, negli ultimi 20 anni.

Questi ritmi di crescita sono correlati al tasso di consumo globale di combustibili fossili. Dalla fine della seconda guerra mondiale al 1975 le emissioni dovute al consumo di combustibili fossili sono aumentate di oltre il quattro per cento all'anno, ma poi l'aumento si è stabilizzato intorno all'uno per cento annuo. La variazione nel tasso di consumo dei combustibili fossili si è verificata dopo l'embargo del petrolio e gli aumenti di prezzo del petrolio degli anni settanta, che hanno indotto una maggiore attenzione al risparmio energetico. I livelli di metano sono stati condizionati anche da altri fattori, tra i quali un mutamento nel-

R. J. Braithwaite, per gentile concessione di «Science», Vol. 297, p. 5579, 12 luglio 2002. © 2002 AAAS

Gli interventi per ridurre **l'impatto delle attività umane sul clima** portano anche benefici economici

le pratiche di coltivazione del riso e sforzi maggiori per catturare il metano emesso dalle discariche e delle attività minerarie.

Se i recenti tassi di crescita di questi gas serra continuassero, il forcing climatico aggiunto nei prossimi 50 anni sarebbe di almeno 1,5 watt per metro quadrato, a cui si deve aggiungere il cambiamento dovuto ad altri fattori, come l'ozono atmosferico e gli aerosol. Questi elementi di forcing non sono controllati con attenzione a livello globale, ma si sa che stanno aumentando in alcuni paesi e diminuendo in altri. Il loro effetto netto dovrebbe essere contenuto, ma potrebbero comunque aggiungere fino a 0,5 watt per metro quadrato. Insomma, se non vi sarà un rallentamento dei tassi di emissione, l'alterazione climatica indotta dall'uomo potrebbe aumentare di due watt per metro quadrato nei prossimi 50 anni.

L'attuale andamento del tasso di crescita dei forcing climatici si situa all'estremo inferiore del campo di variabilità di 2-4 watt per metro quadrato indicato dall'IPCC. Lo scenario di quattro watt per metro quadrato richiede una crescita esponenziale del quattro per cento all'anno di emissioni di biossido di carbonio mantenuto per 50 anni, e un grande aumento dell'inquinamento atmosferico: pertanto non è plausibile.

Tuttavia, il quadro che si ricava a partire dalle tendenze attuali è comunque superiore al livello di un watt per metro quadrato che ho indicato come migliore valutazione del limite di influenza antropogenica pericolosa. Nasce quindi l'interrogativo se esista o meno uno scenario realistico in cui il forcing climatico sia ancora più basso.

Un futuro più roseo

Ho elaborato uno scenario alternativo che contiene l'aumento di forcing climatico nei prossimi 50 anni entro un watt per metro quadrato. Il quadro si fonda su due componenti: in primo luogo, l'arresto o l'inversione della crescita degli inquinanti atmosferici, nello specifico fuliggine, ozono atmosferico e metano; in secondo luogo, il contenimento delle emissioni medie di biossido di carbonio da combustibili fossili nei prossimi 50 anni agli stessi livelli di oggi. In questo scenario, inoltre, il biossido di carbonio e gli altri gas sono egualmente importanti. Personalmente, ritengo che le due componenti previste siano realisticamente ottenibili, e che possano al tempo stesso proteggere la salute umana e incrementare la produttività agricola.

Nell'affrontare il problema dell'inquinamento atmosferico, dovremmo prestare particolare attenzione ai costituenti che più contribuiscono al riscaldamento globale. Il metano offre una grande opportunità. Se le fonti umane di metano vengono ridotte, sarà persino possibile ridurre i livelli atmosferici assoluti di metano, consentendo così un raffreddamento che compenserebbe almeno in parte le emissioni di biossido di carbonio. Le riduzioni di aerosol di fuliggine aiuterebbero a contrastare l'effetto surriscaldante delle riduzioni di aerosol di solfati. I precursori dell'ozono atmosferico oltre al metano, in particolare gli ossidi di azoto e i composti organici volatili, devono essere ridotti per diminuire l'ozono atmosferico di bassa quota, il principale componente dello smog.

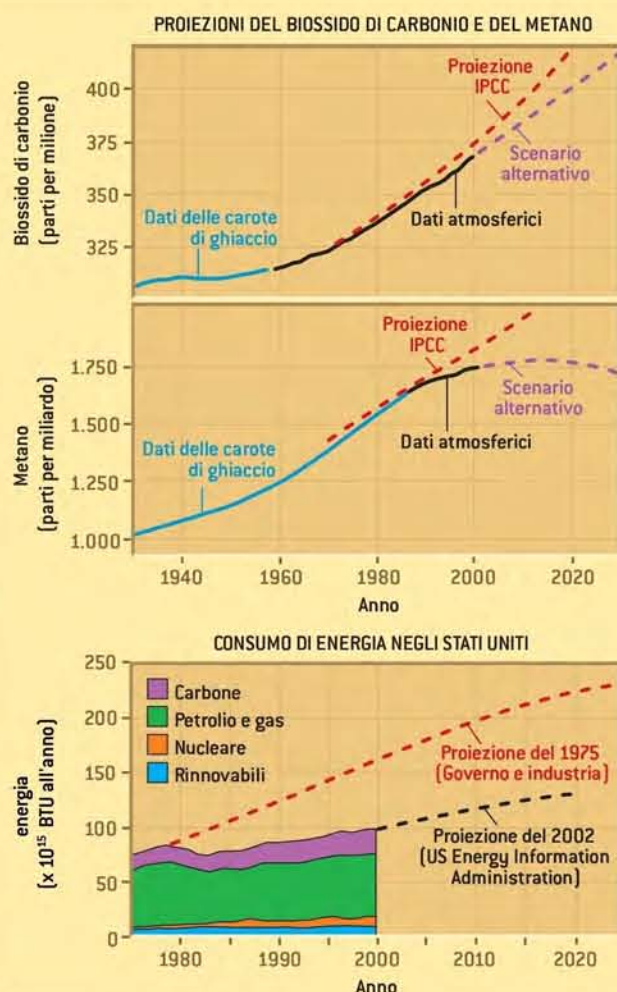
Gli interventi necessari per ridurre i livelli di metano, come la ricattura del gas presso le discariche e gli impianti di trattamento dei rifiuti, e durante l'estrazione dei combustibili fossili, hanno benefici economici che in parte coprono i costi aggiuntivi. In alcuni casi, il valore del metano come combustibile ripaga interamente il costo della sua ricattura. Anche la riduzione della fuliggine porterebbe benefici economici, sia in termini di aumento dell'aspettativa di vita e di anni-lavoro (le minuscole particelle di fuliggine trasportano composti organici e metalli nei polmoni) sia in termini di maggiore produttività agricola in alcune parti del mondo. Le sorgenti primarie di fuliggine sono i combustibili diesel e i biocombustibili (per esempio, il legno e lo sterco di mucca). Queste fonti devono essere prese in considerazione anzitutto per motivi sanitari. Il gasolio potrebbe essere bruciato in modo più pulito, mentre l'utilizzo dell'idrogeno come vettore energetico eliminerebbe sia i precursori dell'ozono sia la fuliggine.

Una migliore efficienza della conversione energetica e un uso più massiccio delle energie rinnovabili potrebbe stabilizzare le emissioni di biossido carbonio nel breve periodo. La riduzione a lungo termine delle emissioni di biossido di carbonio è invece una sfida più complessa, perché il fabbisogno di energia continuerà a crescere. Sarà necessario un progresso generalizzato: continui miglioramenti dell'efficienza, più energia rinnovabile e nuove tecnologie che producano quantità di biossido di carbonio piccole o nulle oppure che lo catturino o lo sequestrino. L'energia nucleare di nuova generazione, se sarà accettata dall'opinione pubblica, potrebbe offrire un importante contributo in questa direzione. Le tendenze globali del biossido di carbonio e del metano (*si veda la finestra nella pagina a fronte*) degli ultimi anni mostrano che il mondo reale sta scendendo al di sotto di tutti gli scenari IPCC. Resta da vedere se i tassi di crescita più contenuti siano un fenomeno transitorio, destinato a innalzarsi nuovamente, o rappresentino invece una differenza significativa. Viceversa, le previsioni del mio scenario alternativo e i tassi di crescita osservati sono in accordo. Il che non è sorprendente, dal momento che quello scenario è stato delineato tenendo a mente i dati osservativi. E nei due anni trascorsi da quando quello scenario alternativo è stato definito le osservazioni si sono mantenute sulla stessa tendenza. Tuttavia, non voglio affatto sostenere che lo scenario alternativo possa concretizzarsi in assenza di impegni concertati a livello internazionale per ridurre gli squilibri climatici indotti dalle attività dell'uomo.

È lecito guardare al futuro con un po' d'ottimismo? Se confrontiamo la situazione di oggi a quella di 10 o 15 anni fa, ci rendiamo conto che i principali elementi necessari per arrestare il cambiamento climatico sono diventati disponibili con notevole rapidità. Certo non sarà facile stabilizzare le concentrazioni di gas serra, ma le evidenze empiriche del cambiamento climatico e del suo impatto si accumulano, e questo influenzerà inevitabilmente l'opinione pubblica, i movimenti politici, l'industria e i governi. C'è solo da sperare che si agisca abbastanza in fretta.

RIDURRE LE EMISSIONI NELL'ATMOSFERA

LE QUANTITÀ DI BIOSSIDO DI CARBONIO E METANO (*i due grafici più in alto*) osservate sono inferiori alle stime dell'IPCC, che si sono costantemente rivelate pessimistiche. Per quanto lo scenario alternativo proposto in questo articolo concordi meglio con le osservazioni, per proseguire nella riduzione dei gas serra è necessario ottenere un rallentamento graduale delle emissioni di biossido di carbonio e metano. Negli ultimi decenni, i miglioramenti dell'efficienza di conversione energetica (*grafico in basso*) hanno permesso che il consumo di energia negli Stati Uniti scendesse al di sotto delle proiezioni, ma per arrivare ai livelli di emissioni di biossido di carbonio dello scenario alternativo saranno necessari guadagni di efficienza più rapidi, a meno che non cresca in misura significativa l'uso dell'energia nucleare o da fonti rinnovabili.

Jen Christiansen/Fonte: James Hansen (*grafici*); Mark Boulton Photo Researchers, Inc. (*fotografia*)

VERO O FALSO?

«Questo inverno è stato così freddo! Altro che riscaldamento globale!»

Il riscaldamento globale è generalizzato, ma finora la sua entità è di poco più di mezzo grado Celsius. Le fluttuazioni quotidiane della temperatura sono invece mediamente entro un range di cinque gradi. Anche calcolate sulla media di un'intera stagione, comportano una variabilità, da un anno all'altro, dell'ordine del grado, quindi il riscaldamento globale non rende ogni stagione sensibilmente più calda di quanto accadesse alcuni decenni fa. Tuttavia, il riscaldamento globale rende già più alta del 60 per cento circa la probabilità che una stagione sia più calda del «normale», in confronto al 30 per cento stimato tra il 1950 e il 1980.

«Il riscaldamento del XX secolo è solo un contraccolpo naturale della piccola età glaciale»

Qualunque contraccolpo della piccola età glaciale europea, che ha raggiunto il suo apice tra il 1650 e il 1750, sarebbe stato ampiamente completato prima dell'inizio del XX secolo. Di fatto, se non vi fossero le attività umane, la tendenza naturale del clima nel lungo periodo sarebbe verso il raffreddamento.

«Il riscaldamento globale indotto dall'uomo ci sta forse salvando dalla prossima era glaciale?»

Sì, ma i gas che abbiamo aggiunto all'atmosfera sono già di gran lunga più abbondanti di quanto sarebbe necessario a quello scopo.

«Il riscaldamento di superficie è dovuto principalmente a effetti di «isola termica» in prossimità delle stazioni meteorologiche»

Non è così. Come previsto nei modelli climatici, il riscaldamento più intenso si riscontra in regioni remote come l'Asia centrale e l'Alaska. Le più grandi aree di riscaldamento di superficie sono al di sopra dell'oceano, ben lontano dagli insediamenti urbani (*si veda sul sito www.giss.nasa.gov/data/update/gistemp*). I profili di temperatura nel sottosuolo, misurati con sondaggi in tutto il mondo, mostrano un riscaldamento delle superfici continentali tra 0,5 e un grado Celsius nel XX secolo.

James Hansen

L'AUTORE

JAMES HANSEN è direttore del Goddard Institute for Space Studies della NASA e ricercatore al Columbia University Earth Institute. Si è laureato in fisica e astronomia all'Università dello Iowa. Hansen è noto anche per i suoi interventi nelle commissioni del Congresso USA, in cui ha contribuito alla crescita della consapevolezza del problema del riscaldamento globale.

BIBLIOGRAFIA

HERZOG H., ELIASSON B., KAARSTAD O., *Catturare i gas serra*, in «Le Scienze», n. 380, p. 46, aprile 2000.

Il clima che cambia, «Le Scienze Dossier», autunno 2000.

SCHNEIDER S., HOLDREN J. P., BONGAARTS J., LOVEJOY T., *Equivoci sulla salute della Terra*, in «Le Scienze», n. 402, p. 81, febbraio 2002.

Le architetture del cosmo

Le più recenti mappe dell'universo hanno rivelato l'esistenza di vasti ammassi di galassie la cui struttura deriva da fluttuazioni primordiali

di Michael A. Strauss

LA MATERIA NON È SPARSA CASUALMENTE nell'universo, ma distribuita in strutture determinate dalla forza di gravità.

David Emmite Photography

Fino agli anni settanta, la cosmologia è stata una disciplina in cui la speculazione teorica la faceva da padrona, e i dati sperimentali erano assai pochi. Negli ultimi venti anni, però, la situazione è cambiata radicalmente, grazie a osservazioni e lavori teorici nuovi. La cosmologia è così diventata una branca rigorosa e quantitativa dell'astrofisica, con un solido fondamento teorico sostenuto da una messe di dati. Il modello del big bang, secondo il quale l'universo ebbe inizio circa 14 miliardi di anni fa con un'espansione a partire da uno stato di densità e temperatura estremamente alte, è in grado di spiegare il moto delle galassie, l'abbondanza dell'idrogeno e dell'elio e le proprietà della radiazione cosmica di fondo (CBR, da *Cosmic Background Radiation*), vale a dire il calore residuo liberato dai gas in espansione. Oggi, poi, i cosmologi hanno fatto un ulteriore salto di qualità, e sostengono di aver compreso la formazione delle strutture presenti nell'universo. Le misurazioni della distribuzione a larga scala delle galassie, descritta dai progetti di mappatura come lo Sloan Digital Sky Survey (SDSS), sono in ottimo accordo con le previsioni teoriche. E disponiamo di un modello coerente che rende conto dell'evoluzione di piccole fluttuazioni di densità formatesi nell'universo primordiale e che hanno dato origine all'attuale cielo notturno pieno di stelle.

Qualunque sia la scala considerata, l'universo intorno a noi mostra una struttura. Le stelle non sono distribuite uniformemente nello spazio ma raggruppate in galassie. Il Sole è una delle molte centinaia di miliardi di stelle della Via Lattea, un disco fortemente appiattito di 100.000 anni luce di diametro. La Via Lattea, a sua volta, è una tra decine di miliardi di galassie presenti nell'universo osservabile. La più grande delle galassie a noi vicine si trova a due milioni di anni luce di distanza. Ma le galassie non sono sparse a caso: dal 5 al 10 per cento di esse è raggruppato in ammassi che contengono fino a 1000 galassie, «compresse» in una regione di pochi milioni di anni luce di diametro.

Fino a qualche tempo fa la maggior parte degli astronomi riteneva che gli ammassi di galassie fossero le più grandi strutture coerenti dell'universo. Le stelle sono riunite in galassie e le galassie in ammassi, ma non sembrava che vi fossero aggregazioni di ammassi di galassie. Questo si accorda bene con la costruzione teorica del big bang. Quando Einstein applicò per la prima volta la teoria della relatività generale all'universo si basò su una semplificazione drastica: l'universo, in media, è omogeneo (non ha addensamenti di grandi dimensioni) e isotropo (appare uguale in qualunque direzione). Egli chiamò questo assunto «principio cosmologico»: il principio su cui si basano tutti i moderni modelli scientifici dell'universo.

La scoperta delle grandi strutture

Verificare se il principio cosmologico è applicabile a scale di grandezza superiore a quella degli ammassi di galassie richiede una capacità di indagine piuttosto profonda. Quando si punta il telescopio verso il cielo notturno, l'oculare rivela stelle, pianeti e galassie. Ma senza ulteriori informazioni non è possibile determinare le reali dimensioni degli oggetti, né la distanza a cui si trovano. Fortunatamente, c'è un modo per ottenere queste informazioni. Per le galassie, la chiave sta nel fatto che viviamo in un universo in espansione: le galassie si allontanano l'una dall'altra, e quanto più una galassia è distante tanto più velocemente si allontana da noi. Questo moto si manifesta con uno spostamento verso il rosso, o *redshift*, dello spettro di radiazione della galassia. In altre parole, l'energia dei fotoni che provengono da una galassia decresce di una quantità che dipende dalla sua distanza, e le lunghezze d'onda relative si spostano dal blu verso il rosso. Una volta stabilita questa relazione per gli oggetti di distanza nota, i ricercatori la usano per studiare le galassie di distanza non conosciuta. Ottenuti gli spettri delle galassie, si determina il loro redshift, e si ricava la loro distanza.

Verso la fine degli anni settanta, i progressi nella tecnologia dei telescopi e dei rivelatori rese possibile effettuare estesi rilevamenti di redshift di galassie e creare così mappe tridimensionali del cosmo. Quando ero studente lessi un articolo di «Scientific American» scritto da Stephen A. Gregory e Laird A. Thompson (si veda *Superammassi e vuoti nella distribuzione delle galassie*, in «Le Scienze» n. 165, maggio 1982) che riportava il dettaglio di alcune di queste prime mappe tridimensionali. Gli autori citavano una circostanza che suggeriva come il principio cosmologico di Einstein potesse essere sbagliato: la scoperta di strutture coerenti molto più grandi dei singoli ammassi, e di grandi vuoti di molte decine di milioni di anni luce di diametro. Ne rimasi affascinato. Questo esercizio di cosmografia, che consiste nello scoprire strutture interamente nuove nell'universo, mi sembrò una delle cose più eccitanti a cui dedicarsi in ambito scientifico, e mi indirizzò verso la mia carriera attuale.

Nel 1986 Valérie de Lapparent, Margaret J. Geller e John P. Huchra dello Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) pubblicarono una mappa della distribuzione di 1100 galassie, un estratto di ciò che alla fine sarebbe stato il rilevamento di 18.000 di questi oggetti. Lo studio confermò l'abbondanza e l'onnipresenza delle grandi strutture, rivelando una conformazione «spugnosa» del cosmo, dovuta al fatto che le galassie risultavano allineate in lunghi filamenti che lasciano nello spazio enormi vuoti. Tra gli aspetti più significativi della mappa c'era una struttura che fu chiamata la Grande Parete (*Great Wall*), che si allungava per 700 milioni di anni luce da un estremo all'altro della regione osservata. Poiché la mappa non rivelava la fine della Parete, la sua estensione complessiva rimaneva ignota.

La presenza della Grande Parete e l'incertezza sulla sua estensione alimentò il sospetto che il principio cosmologico, e quindi anche il nostro assunto teorico di base sull'espansione dell'universo, potessero essere sbagliati. Einstein era in errore? L'universo non è mediamente omogeneo? Era chiaro che per risolvere la questione occorreva indagare su volumi più grandi.

Dal caldo al freddo

Il paradigma del big bang presuppone che la struttura di distribuzione delle galassie che vediamo oggi si sia sviluppata a partire da variazioni presenti in un universo primordiale quasi perfettamente «liscio». Le fluttuazioni iniziali erano lievi; la densità, misurata in termini della temperatura della radiazione cosmica di fondo, variava da una regione all'altra solo di una parte su 100.000 (si veda *La sinfonia cosmica* di Wayne Hu e Martin White, in «Le Scienze» n. 427, marzo 2004). Se una regione di spazio aveva una densità più alta della media, esercitava maggiore attrazione gravitazionale, perciò nelle sue vicinanze la materia era attratta verso di essa. Analogamente, una regione di spazio leggermente meno densa perdeva via via massa. Attraverso questo processo di instabilità gravitazionale, alla fine le regioni più dense diventarono gli enormi superammassi che vediamo oggi, mentre le meno dense diedero origine ai grandi vuoti.

All'epoca in cui vennero completati i primi rilevamenti, gli astronomi dovettero prendere atto di un fatto sconcertante: le stelle e i gas che vediamo nelle galassie rappresentano solo una piccola frazione (circa il due per cento) della materia totale nell'universo; la parte restante può essere rivelata solo indirettamente, attraverso i suoi effetti gravitazionali. Per descrivere questa materia oscura, gli astronomi hanno proposto diversi modelli. Questi sono suddivisi in due ampie categorie, a seconda che la materia oscura sia fredda o calda, poiché questa differenza è cruciale per l'evoluzione della struttura.

Secondo lo scenario della materia oscura fredda – suggerito da James Peebles, della Princeton University, e da altri – le prime strutture a formarsi furono oggetti relativamente piccoli, come galassie e parti di esse. Via via che il tempo passava, la gravitazione li aggregava, formando strutture ancora più grandi. In questo modello, la Grande Parete si è formata relativamente di recente. Secondo lo scenario della materia oscura calda, postulato da Yakov B. Zel'dovich e dai suoi colleghi dell'Università di Mosca, nell'universo primordiale la materia oscura si è mossa

IN SINTESI

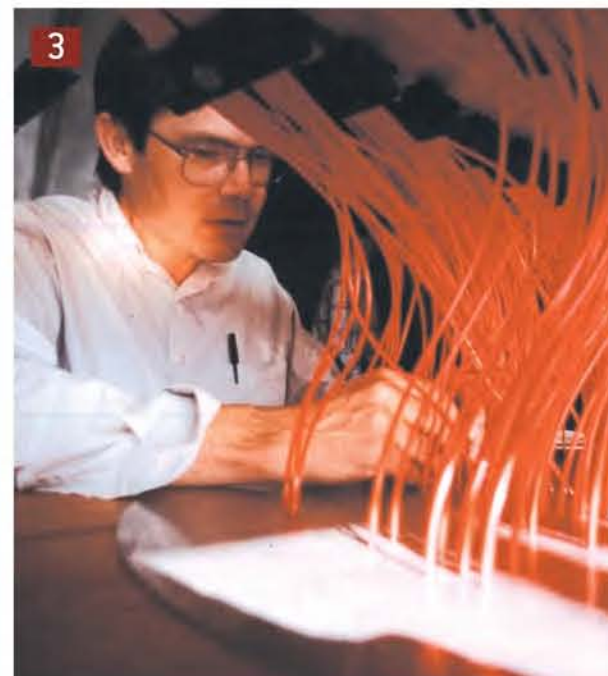
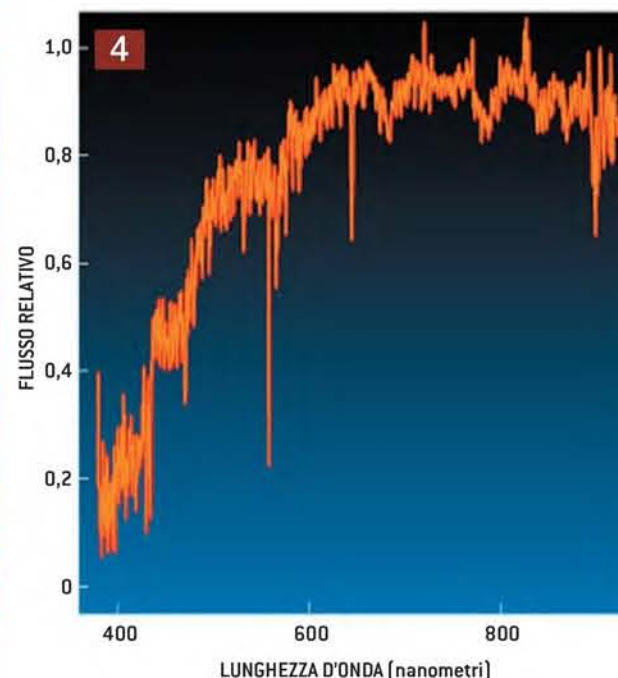
- Gli astronomi stanno realizzando mappe tridimensionali sempre più dettagliate delle posizioni delle galassie e dei loro ammassi. Il più importante di questi progetti, lo Sloan Digital Sky Survey, sta mappando circa un milione di galassie, situate fino a una distanza di due miliardi di anni luce da noi.
- Le mappe mostrano che le galassie sono organizzate in strutture enormi, che si estendono per centinaia di milioni di anni luce. Queste strutture sono il frutto di un accrescimento di deboli fluttuazioni di densità nell'universo primordiale.
- I rilevamenti sono diventati così precisi che ora permettono di ottenere stime dei parametri cosmologici alternative a quelle ricavate dall'analisi della radiazione cosmica di fondo (CBR). I due insiemi di stime sono concordanti: ciò indica che gli astronomi dispongono finalmente di un resoconto coerente di 14 miliardi di anni di storia cosmica.

COME SCANDAGLIARE IL COSMO IN QUATTRO (DIFFICILI) PASSI

Lo Sloan Digital Sky Survey, il più avanzato dei progetti di mappatura del cosmo, sta compilando l'atlante di un quarto del cielo. A esso è dedicato in maniera esclusiva il telescopio da 2,5 metri situato sulla cima dell'Apache Point, nel New Mexico.

Nelle notti chiare e senza luna, lo strumento acquisisce immagini attraverso cinque differenti filtri colorati alla velocità di 20 gradi quadrati all'ora, esaminando ogni notte milioni di corpi celesti .

2

Le galassie e gli altri oggetti cosmici vengono identificati dal software e selezionati per la spettroscopia. Nell'immagine, la galassia a spirale UGC 03214, nella costellazione di Orione.

Da una piastra dotata di 640 fori parte una serie di fibre ottiche che conducono la luce di ciascun corpo celeste a uno spettrografo, utilizzato nelle notti in cui il cielo è parzialmente velato.

Gli spettri che ne risultano consentono ai ricercatori di classificare con precisione gli oggetti celesti. Da essi, inoltre, è possibile determinare i redshift dei diversi oggetti, e quindi le loro distanze.

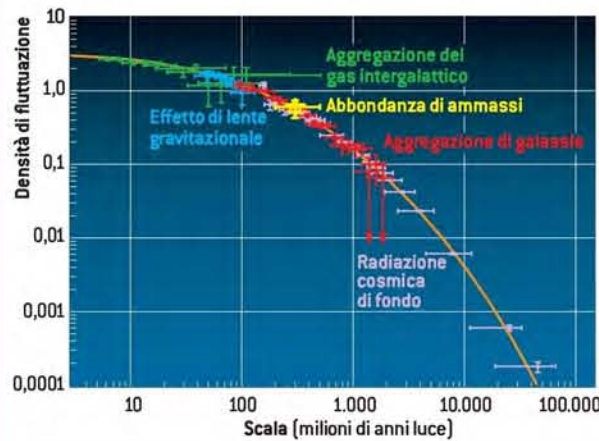
SDSS Collaboration

abbastanza velocemente da impedire la formazione di qualunque ammasso a piccole scale. Le prime strutture a formarsi sarebbero state grandi strati e filamenti estesi per decine o centinaia di milioni di anni luce, che solo più tardi si frammentarono a formare le galassie. In altre parole, secondo questo modello la Grande Parete è antica.

Di conseguenza, la generazione successiva di rilevamenti non ha soltanto verificato il principio cosmologico di Einstein e identificato le più grandi strutture dell'universo, ma ne ha anche indagato la natura. Uno di questi rilevamenti è stato effettuato nei primi anni novanta da Stephen A. Shectman della Carnegie Institution di Washington e dai suoi collaboratori, grazie al telescopio di Las Campanas da 2,5 metri di diametro (si veda *La mappa dell'universo*, di Stephen D. Landy, in «Le Scienze» n. 372, agosto 1999). La mappatura riguardava 26.418 galassie, coprendo un volume apprezzabilmente più grande dell'originale rilevamento del CfA. Secondo un membro del gruppo, Robert P. Kirshner del CfA, il rilevamento di Las Campanas aveva trovato «il limite dimensionale». Esso, infatti, rivelava una distribuzione di galassie simile a quella del rilevamento del CfA, ma non «vedeva» strutture più ampie della Grande Parete. Il principio cosmologico di Einstein sembrava dunque essere valido: il cosmo appariva omogeneo e isotropo anche su grandi distanze.

Tuttavia, il rilevamento di Las Campanas non era ancora abbastanza ampio da poter essere considerato definitivo: in particolare non diceva nulla su che cosa stesse succedendo nelle regioni di spazio che misurano uno o due miliardi di anni luce di diametro. È a queste scale massime che la formazione di ammassi è più facile da interpretare teoricamente, anche se è più ardua da misurare sperimentalmente. Le variazioni nel numero di galassie su un simile volume sono lievi, ed è facile introdurre nel campione e nella procedura di selezione errori che possono indicare la presenza di ammassi in realtà inesistenti. Gli

DISTRIBUZIONE COMPLESSIVA

Le mappe ottenute con i rilevamenti possono essere ricondotte a uno spettro di frequenza, che riporta la variazione relativa di densità (*asse verticale*) da un punto all'altro, in regioni di dimensioni differenti (*asse orizzontale*). Altri dati – la radiazione cosmica di fondo, le lenti gravitazionali, i rilevamenti degli ammassi di galassie, la presenza di nubi di idrogeno – possono essere rappresentati nello stesso modo. E tutti si collocano sulla stessa linea di universo (*linea continua*). La densità delle fluttuazioni si avvicina a zero, corroborando il principio cosmologico di Einstein. Le frecce rappresentano i limiti superiori.

Bryan Christie/Fonte: Sloan Digital Sky Survey

Nelle profondità del cosmo c'è una **Grande Parete** di galassie che si estende per **un miliardo di anni luce**

astronomi, per esempio, scelgono tipicamente tutte le galassie più luminose di un certo valore da includere in un rilevamento di redshift. Se sovrastimano la luminosità delle galassie in una parte del cielo, il campione avrà troppe galassie in quella regione, portando a una falsa misurazione di ammassi. Così, un rilevamento di redshift definitivo deve non solo coprire un volume enorme, ma anche essere calibrato in modo molto preciso.

L'AUTORE

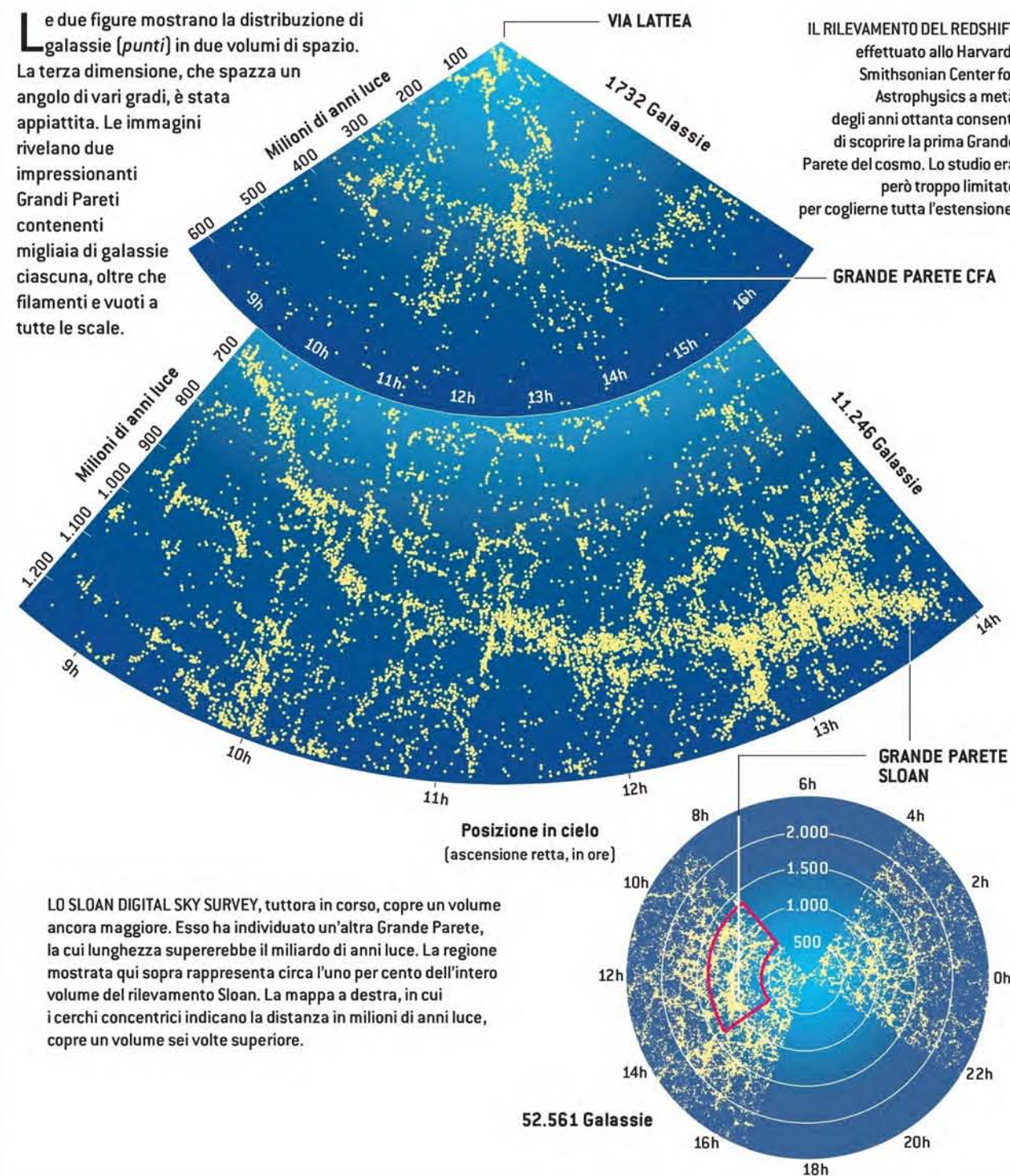
MICHAEL A. STRAUSS è *project scientist* aggiunto e portavoce dello Sloan Digital Sky Survey, un progetto per realizzare una mappa completa di un quarto del cielo. La sua carriera scientifica si è svolta tra le due coste degli Stati Uniti: dopo aver conseguito, nel 1989, il Ph.D. in fisica presso l'Università della California a Berkeley, ha coperto posizioni di post-dottorato presso il California Institute of Technology e poi presso l'Institute for Advanced Study di Princeton. Dal 1995 lavora presso la Princeton University. In precedenza ha svolto attività di ricerca presso diversi osservatori astronomici e radioastronomici, fra cui quelli di Arecibo, Cerro Tololo e Apache Point. Strauss ringrazia i colleghi del progetto Sloan per il favoloso insieme di dati che hanno raccolto.

In una notte limpida...

Nei tardi anni ottanta, James E. Gunn di Princeton, Richard G. Kron e Donald G. York, dell'Università di Chicago, avviarono una collaborazione con altri colleghi per affrontare correttamente il problema. Cercarono di misurare la distribuzione di galassie nel più grande volume conosciuto fino ad allora, con un attento controllo della calibrazione. Circa un decennio più tardi cominciarono le operazioni dello Sloan Digital Sky Survey, una collaborazione di 200 astronomi frutto di un investimento di 80 milioni di dollari. L'SDSS impiega un telescopio appositamente dedicato con uno specchio principale di 2,5 metri di diametro. Le sue modalità operative sono due. Nelle notti più limpide, utilizza una camera ad ampio campo ottico per scattare foto accuratamente calibrate del cielo notturno in cinque ampie bande di radiazione. Si tratta di una fotocamera a CCD, dispositivi molto sensibili la cui risposta è estremamente accurata.

Nelle notti di luna piena o con debole copertura di nubi, il telescopio utilizza invece una coppia di spettrografi le cui fibre ottiche rilevano lo spettro, e quindi il redshift, di 608 oggetti alla volta. A differenza dei telescopi tradizionali, per i quali i tempi di osservazione sono distribuiti tra diversi programmi scientifici, questo telescopio è dedicato soltanto al rilevamento, ogni notte per cinque anni di fila. Il progetto è giunto a metà del cammino che lo porterà verso il traguardo finale: misurare

LA GRANDE PARETE

Le due figure mostrano la distribuzione di galassie (*punti*) in due volumi di spazio. La terza dimensione, che spazza un angolo di vari gradi, è stata appiattita. Le immagini rivelano due impressionanti Grandi Pareti contenenti migliaia di galassie ciascuna, oltre che filamenti e vuoti a tutte le scale.

IL RILEVAMENTO DEL REDSHIFT effettuato allo Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics a metà degli anni ottanta consentì di scoprire la prima Grande Parete del cosmo. Lo studio era però troppo limitato per coglierne tutta l'estensione.

LO SLOAN DIGITAL SKY SURVEY, tuttora in corso, copre un volume ancora maggiore. Esso ha individuato un'altra Grande Parete, la cui lunghezza supererebbe il miliardo di anni luce. La regione mostrata qui sopra rappresenta circa l'uno per cento dell'intero volume del rilevamento Sloan. La mappa a destra, in cui i cerchi concentrici indicano la distanza in milioni di anni luce, copre un volume sei volte superiore.

Bryan Christie/Fonte: J. Richard Gott e Mario Jurić, Princeton University (mappa in alto)/SDSS Collaboration (mappa in basso)

un milione di redshift di galassie e quasar. A metà marzo, sono stati resi noti lo spettro e il redshift di oltre 350.000 oggetti celesti, tra cui 260.000 galassie.

In un progetto parallelo, un gruppo di astronomi australiani e britannici ha costruito per l'Anglo-Australian Telescope da 3,9 metri uno spettrografo in grado di misurare gli spettri di 400 oggetti alla volta in un campo ottico di due gradi per lato (da cui il nome *Two Degree Field*, o 2dF). Il gruppo 2dF ha lavorato sulla base di cataloghi realizzati da atlanti fotografici già disponibili, attentamente calibrati e scanditi elettronicamente. Ormai completato, in cinque anni il rilevamento ha misurato i redshift di 221.414 galassie.

I nostri rilevamenti descrivono la distribuzione di galassie. Ma la materia oscura rende le cose un po' più complicate. Non c'è ragione di credere che la distribuzione delle galassie sia la stessa di quella della materia oscura. Per esempio, le galassie po-

trebbero tendere a formarsi solo in regioni che contengono una densità di materia oscura al di sopra del valore medio: uno scenario che gli astronomi chiamano polarizzazione (*bias*).

Analizzando precedenti generazioni di rilevamenti di redshift, siamo riusciti a dimostrare che la distribuzione delle galassie e la materia oscura sono strettamente correlate, ma non siamo stati in grado di distinguere tra modelli semplici di polarizzazione e il caso senza polarizzazione. Più di recente, Licia Verde dell'Università della Pennsylvania ha usato il rilevamento di redshift 2dF per misurare triplette di galassie. È risultato che il numero di queste configurazioni dipende dalla massa totale, materia oscura compresa, e che la distribuzione delle galassie è praticamente senza polarizzazione: il campo di densità delle galassie è lo stesso della materia oscura, il che significa che i rilevamenti di galassia riproducono accuratamente la distribuzione complessiva della materia nel cosmo.

Il potere dello spettro di frequenza

Alla luce di ciò, i cosmologi possono interpretare la mappa galattica. Tra gli strumenti statistici più utili per descrivere la tendenza delle galassie a formare ammassi (*clustering*) vi è lo spettro di frequenza. Si immagini di collocare a caso nell'universo una serie di sfere di raggio dato (per esempio 40 milioni di anni luce) e di contare il numero di galassie contenuto in ciascuna di esse. Poiché le galassie sono raccolte in ammassi, questo numero varierà significativamente da una sfera all'altra. La variazione del numero di galassie è una misura della tendenza all'aggregazione della loro distribuzione a una scala, in questo caso, di 40 milioni di anni luce. I cosmologi ripetono l'esercizio con sfere di diversi raggi per misurare questa aggregazione a scale differenti.

Un'utile analogia è quella con la possibilità di esprimere un suono complesso in termini dei contributi di onde sonore di differenti lunghezze d'onda. L'equalizzatore grafico di un impianto stereo svolge esattamente questa funzione: mostra quanto pesano le note basse, quanto le note alte, e così via. In un concerto dal vivo, una persona con un orecchio musicalmente allenato può facilmente distinguere l'ottavino dal fagotto. I cosmologi fanno la stessa cosa con la distribuzione delle galassie. La quantità relativa di strutture a grandi e piccole scale è un metodo d'indagine potente in cosmologia.

Lo spettro di frequenza è stato misurato sia dal gruppo del 2dF sia da quello dello Sloan, con risultati concordanti. La prima cosa da notare è che le fluttuazioni sono più deboli via via che si procede verso scale maggiori. Le fluttuazioni deboli indicano che la distribuzione delle galassie è molto vicina all'essere omogenea: esattamente ciò che richiede il principio cosmologico di Einstein.

In secondo luogo, se vengono rappresentate su una scala logaritmica, le fluttuazioni non formano una linea retta. La deviazione da essa è una conferma del fatto che la dinamica dell'universo è cambiata nel tempo. Da altre osservazioni, gli astronomi hanno concluso che la densità di energia dell'universo è dominata dalla materia e da una componente misteriosa nota come energia oscura. I fotoni sono trascurabili, in quanto la loro energia è stata indebolita dall'espansione cosmica. Estrapolando indietro nel tempo, tuttavia, quando l'universo aveva meno di 75.000 anni i fotoni dominavano. All'epoca, la gravitazione non determinò la crescita delle fluttuazioni nel tempo così come fa adesso. Il che, a sua volta, fece sì che lo spettro di frequenza si comportasse in modo differente a scale maggiori (dell'ordine di più di 1,2 miliardi di anni luce).

La scala esatta di questa deviazione fornisce una misura della densità totale di materia nell'universo, e il risultato – un valore noto come densità critica, pari a circa $2{,}5 \times 10^{-27}$ chilogrammi per metro cubo di spazio – è in accordo con il valore ottenuto con altre misurazioni. Infine, la combinazione di questi risultati suggerisce fortemente che la materia oscura sia tutta della varietà fredda. La materia oscura calda avrebbe smorzato le fluttuazioni nella distribuzione delle galassie a scale più piccole, ma ciò non è stato osservato.

Le fluttuazioni che osserviamo nella distribuzione delle galassie a grandi scale sarebbero semplicemente una versione amplificata di quelle dell'universo primordiale. Queste fluttuazioni primordiali sono evidenti nella CBR; perciò è possibile confrontare direttamente con essa gli spettri di potenza delle galassie. Sorprendentemente, otteniamo risposte concordanti da questi due approcci. A scale che si avvicinano al miliardo di anni luce, la densità di galassie fluttua di circa una parte su 10. La CBR rivela fluttuazioni di una parte su 100.000, un valore che, estrapolato al presente, è in accordo con il modello. Ciò dà fiducia nel fatto che la nostra descrizione cosmologica – che prevede un big bang, un'instabilità gravitazionale e tutto il resto – sia corretta.

Il maggiore rilevamento dell'SDSS indaga la struttura del cosmo a scale che vanno da 100 milioni a più di un miliardo di anni luce. Per indagare a scale ancora maggiori, l'SDSS ha un secondo campione di galassie estremamente luminose che si estende per più di cinque miliardi di anni luce. Per scale più piccole, un terzo campione analizza le righe di assorbimento degli spettri di quasar distanti, la cui luce passa attraverso una densa rete di nubi di idrogeno che non hanno ancora formato galassie.

La distribuzione delle galassie sembra essere omogenea, come previsto dal principio cosmologico di Einstein

Con questi dati, i cosmologi stanno lavorando per stabilire una connessione ancora più stretta tra questi rilevamenti (che indagano le strutture cosmiche attuali e non solo quelle del passato remoto) e la CBR (che indaga le strutture cosmiche dell'universo primordiale). In particolare, lo spettro di frequenza della radiazione di fondo mostra una serie di picchi caratteristici che riflettono la quantità relativa di materia oscura e materia ordinaria. I ricercatori sperano di trovare i picchi corrispondenti nello spettro di frequenza attuale. Se ci riusciranno, sarà un'ulteriore conferma che le fluttuazioni osservate ora si sono evolute direttamente da quelle osservate nell'universo primordiale.

Un altro modo di ricostruire lo sviluppo di strutture nel tempo è indagare la distribuzione delle galassie più distanti, dato che guardare lontano equivale a guardare indietro nel tempo. Nell'universo primordiale, la materia oscura era probabilmente debolmente ammassata, poiché l'instabilità gravitazionale non aveva avuto molto tempo per agire. Ma i rilevamenti effettuati con il Very Large Telescope dello European Southern Observatory, in Cile, e con il Keck Observatory, alle Hawaii, mostrano che le galassie più remote sono ammassate e distribuite nelle stesse strutture filamentose e a bolla delle galassie più vicine. Il che appare strano: a differenza delle galassie attuali, che seguono la materia oscura, le galassie primordiali dovrebbero essere più ammassate di quanto lo sia la materia oscura sottostante. Questo schema potrebbe essere un indizio di come le galassie si sono formate.

Siamo quindi vicini a completare la comprensione dello sviluppo della struttura del cosmo, dalle ondulazioni primordiali agli ammassi di galassie luminose dell'universo attuale. Ciò significa che il lavoro dei prossimi anni è tagliato su misura per i cosmologi.

Qual è stato il meccanismo che diede origine alle fluttuazioni iniziali della radiazione di fondo? Come si formarono esattamente le galassie? Perché esse hanno le proprietà che hanno? Avrebbero potuto avere un'altra evoluzione, dal momento che è possibile immaginare un universo con fluttuazioni che cominciarono con ampiezze molto maggiori o molto minori? Sono solo alcune delle domande a cui dovranno rispondere in futuro gli scienziati. E chissà che uno di coloro che ci riusciranno non sia tra gli studenti che stanno terminando ora di leggere questo articolo.

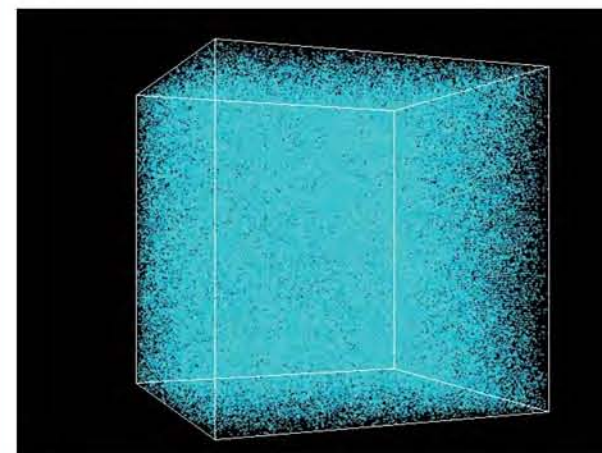
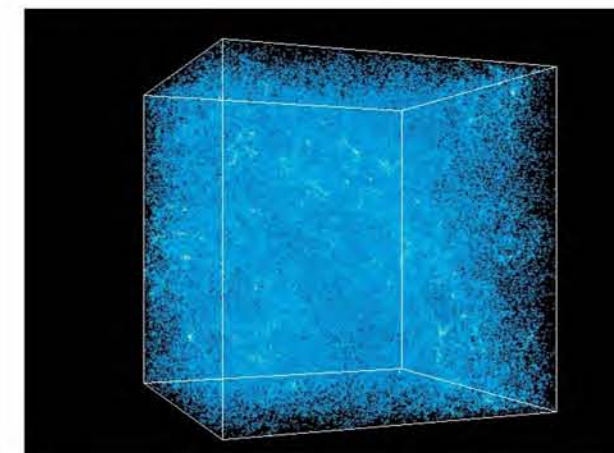
PER APPROFONDIRE

PERCIVAL WILL J. e altri, *The 2dF Galaxy Redshift Survey: The Power Spectrum and the Matter Content of the Universe*, in «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», Vol. 327, n. 4, pp. 1297-1306, novembre 2001. Disponibile on line sul sito: arXiv.org/abs/astro-ph/0105252.

TEGMARK MAX e altri, *The Three-Dimensional Power Spectrum of Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*, in «Astrophysical Journal» (in stampa). On line: arXiv.org/abs/ astro-ph/0310725.

Il sito Web dello Sloan Digital Sky Survey è www.sdss.org. Quello del 2dF Galaxy Redshift Survey è msowww.anu.edu.au/2dFGRS.

COSTRUIRE L'UNIVERSO

Per collegare le strutture cosmiche odierne (rivelate dal progetto Sloan e da altri progetti di mappatura) con quelle presenti nell'universo primigenio (rivelate dalle osservazioni sulla radiazione cosmica di fondo, o CBR), i cosmologi ricorrono a simulazioni al computer. Ogni immagine è una «fotografia» del cosmo a un certo tempo dal big bang. Dato che l'universo è in espansione, i disegni non sono in scala: il primo cubo ha un lato di circa cinque miloni di anni luce, l'ultimo di circa 140 milioni di anni luce. I punti rappresentano la materia. La simulazione è stata eseguita presso il National Center for Supercomputer Applications (l'intero sviluppo della simulazione può essere visto all'indirizzo web: cfcp.uchicago.edu/lss/filaments.html).

120 milioni di anni: partendo da leggere fluttuazioni, rivelate dalla radiazione cosmica di fondo, la materia comincia ad aggregarsi per effetto dell'attrazione gravitazionale.

490 milioni di anni: nel tempo, la materia si è concentrata in vaste regioni, a spese di altre che appaiono meno dense. Si formano le prime galassie.

1,2 miliardi di anni: con il tempo la gravità concentra la materia in vasti filamenti circondati dal vuoto.

13,7 miliardi di anni (oggi): la crescita di grandi strutture è cessata, a causa dell'accelerazione cosmica che la contrasta.

Andrey Kravtsov (Università di Chicago) e Anatoly Klypin (New Mexico State University)

Ritorno al K2

A cinquant'anni dalla conquista della seconda vetta del mondo, l'Italia torna sul K2 con la più grande spedizione scientifica mai organizzata in alta quota

di Andrea Vico

ITALCABLE

LUH0512/TKER028 SKARDU 19 12 1445

PER LA RISPOSTA TELEFONATE AL N. 88.38

LT PRESIDENTE CLUB ALPINO ITALIANO FOSCOLO 3 MILANO =

TELEGRAMMA Italcable Italo Radio

1954 AGO 7 27

860

PER PLT

LIETO ANNUNCIAR CONQUISTA ITALIANA SECONDA CIMA DEL MONDO 31 LUGLIO =

DESIO +

CLUB ALPINO ITALIANO R 13 AGO 1954

ITALCABLE

Museo della Montagna di Torino

Professor Desio comunica ufficio spedizione italiana K2 vittoria raggiunta trentuno luglio – Tutti riuniti campo base – Viva l'Italia». Il testo di questo telegramma, inviato al Club Alpino Italiano da Vittorio Lombardi, vice presidente della Commissione esecutiva per il K2, cinque giorni dopo il successo dell'impresa, fa il giro della penisola in un istante. Una settimana dopo, da Skardu, la conquista sarà confermata dai protagonisti con un messaggio ancora più laconico. La cima del K2 (8611 metri), la montagna seconda solo all'Everest in altezza, ma prima tra tutte per difficoltà, è stata raggiunta dagli alpinisti italiani guidati dal professore Ardito Desio. Per l'Italia di allora, a meno di un decennio dal disastroso epilogo del secondo conflitto mondiale, è «l'onor del mondo»: per ardimento, serietà e capacità organizzative torniamo alla pari con le altre nazioni occidentali. Oggi, a cinquant'anni di distanza, il nostro paese si prepara a rivivere quella stagione di successi, pianificando una spedizione alpinistico-scientifica al K2 destinata a stabilire nuovi primati.

Galen Rowell/Corbis/Contrasto

Allestito nuovamente il campo base sul ghiacciaio Baltoro, poco oltre quota 5000, alla fine di luglio 33 alpinisti italiani (che fra tutti vantano 56 «ottomila» conquistati) affronteranno negli stessi giorni il K2 e l'Everest. Gli scalatori, tra cui due donne, Nives Meroi e Nadia Tiraboschi, si divideranno in tre differenti cordate. Una ripercorrerà la via «storica» che passa dallo sperone Abruzzi (sul versante pachistano), la seconda tenterà la salita dallo Spigolo Nord (sul versante cinese), mentre la terza si dedicherà all'Everest. Già questa contemporaneità, così tanti alpinisti della stessa nazione a sfidare in sincrono le due maggiori vette della Terra, è un primato sportivo e organizzativo di tutto rilievo.

Ma la spedizione italiana, come fu anche nel 1954, per espressa volontà di Ardito Desio, ha un risvolto scientifico ancora più ricco e ambizioso. Organizzati in nove progetti di ricerca, fra giugno e agosto saranno 49 gli scienziati italiani distribuiti fra il campo base del K2 e la Piramide costruita ai piedi dell'Everest che condurranno campagne di ricerca, raccolta dati e test in geodesia, glaciologia, scienze ambientali, medicina e fisiologia ed ecocompatibilità. Si tratta della più complessa e variegata campagna di studi scientifici in alta quota mai organizzata al mondo, che coinvolge il CNR e le università di mezza Italia (con la partecipazione di 19 diversi dipartimenti), coordinati dall'Istituto nazionale di ricerca scientifica e tecnologica sulla montagna (INRM) e sotto la direzione scientifica di Paolo Cerretelli (della sezione di Milano del CNR). Due milioni e 310.000 euro i costi dell'intero progetto.

Ev-K²-CNR/ Mountain Equipe Srl

Misurare la montagna

Ma perché è così importante il K2 per gli italiani? Perché quella scalata è entrata a far parte del nostro immaginario collettivo e oggi ci si dà un gran daffare per celebrarla? Secondo solo all'Everest (che è alto 8846 metri), per l'alpinismo classico il K2 era una sfida appetitosa, perché tecnicamente più arduo da scalare. Tant'è che numerosi sono stati gli alpinisti che «snobbarono» il primo per concentrarsi sul secondo, capace di attirare le attenzioni di quei «palati fini». Lo stesso Reinhold Messner, il primo a scalare tutti i 14 ottomila del mondo, ha sempre affermato che il K2 è il più difficile.

«Oggi torniamo sul K2 per ricordare quella storica impresa, ma soprattutto per far compiere nuovi passi avanti alla ricerca», spiega Giancarlo Morandi, alla guida dell'INRM, l'ente che rappresenta il punto di riferimento per lo sviluppo delle conoscenze scientifiche in ambiente montano e che coordinerà il programma scientifico della spedizione. «L'Italia vanta una tradizione di altissimo livello in relazione alla ricerca scientifica in montagna. In particolare, per quanto riguarda le aree dell'Himalaya e del Karakorum, da circa un secolo – a partire dalle spedizioni del Duca degli Abruzzi, dei fratelli Piacenza, di De Filippi e di Ardito Desio – i ricercatori italiani hanno svolto un'enorme mole di lavoro in numerosi campi disciplinari apportando contributi fondamentali al progresso e alla conoscenza. Sono oltre 500 gli studi scientifici a firma italiana pubblicati sulle più prestigiose riviste internazionali in numerosi settori.»

IN SINTESI

- Battezzata K2 (da Karakorum 2) nel 1856 dal Servizio trigonometrico inglese, la seconda vetta del mondo per altezza fu conquistata, il 31 luglio 1954, da due alpinisti, Achille Compagnoni e Lino Lacedelli, della spedizione italiana guidata da Ardito Desio. Benché seguita da uno strascico di polemiche, anche giudiziarie, l'impresa rappresenta uno dei maggiori successi dell'alpinismo italiano.
- A distanza di cinquant'anni dalla conquista del K2, l'Italia si prepara a tornare sul Karakorum con la più grande spedizione alpinistico-scientifica mai effettuata in alta quota, coordinata dall'Istituto nazionale di ricerca scientifica e tecnologica sulla montagna (INRM), un'impresa che coinvolge il CNR e ben 19 dipartimenti universitari.
- Tra gli obiettivi della spedizione, che prevede nove diversi progetti di ricerca in altrettanti campi, l'accertamento definitivo dell'altezza del K2 e lo studio dei ghiacciai himalayani, che sono importanti indicatori del cambiamento climatico in atto. Nel campo della fisiologia e della medicina saranno effettuati studi sul comportamento dell'organismo in alta quota e ricerche specifiche sulle popolazioni locali.

Uno dei principali obiettivi è quello di stabilire con definitiva certezza l'altezza del K2 e dell'Everest. Il metodo delle triangolazioni ha dei limiti, principalmente legati alla profondità dello strato nevoso che ricopre le cime delle montagne stesse. Negli anni, molti fra gli alpinisti giunti in vetta hanno tentato di misurare la coltre nevosa con sonde graduate, ottenendo risultati approssimativi. Di fatto non si sono mai effettuate misure strumentali. Il gruppo di geodesia guidato da Giorgio Poretti, dell'Università di Trieste, ha realizzato una speciale apparecchiatura costituita dall'accoppiamento di un georadar e di un GPS, con lo scopo di misurare contemporaneamente, con grande precisione, la profondità della neve e la quota della sottostante superficie rocciosa. Una tecnica già applicata in altre occasioni (in Antartide, per esempio), ma mai in alta montagna, perché si trattava di oggetti delicati, pesanti e ingombranti. Oggi, invece, tutto l'occorrente è stato miniaturizzato e ottimizzato per contenere il peso in circa quattro chilogrammi, in modo da essere portato agevolmente in vetta dagli alpinisti, mentre speciali batterie al litio alimenteranno il georadar fino a 40 gradi sotto zero.

«Accanto al valore "geografico" di determinare con precisione l'altezza dell'Everest e del K2», precisa Poretti, «se il nostro apparecchio si comporterà bene, potrà poi generare una versione semplificata da dare in dotazione al Soccorso Alpino per trovare oggetti o corpi sepolti dalla neve. Inoltre, i dati raccolti ci permetteranno di continuare e perfezionare gli studi sulla struttura tettonica dell'orogene himalayano, proseguendo il lavoro iniziato oltre un secolo fa, prima da De Filippi, quindi dal Duca di Spoleto, infine da Desio, tra gli anni settanta e ottanta».

Il lavoro degli scienziati si concentrerà anche su glaciologia e scienze ambientali. Grande attenzione sarà dedicata ai ghiacciai, che sempre più si rivelano preziosi testimoni dell'evoluzione del clima, sia per i loro movimenti e trasformazioni, sia per i materiali che accumulano e custodiscono nel tempo. Un gruppo di ricercatori coordinati da Claudio Smiraglia, dell'Università di Milano, osserverà i mutamenti in atto sul ghiacciaio Baltoro, per capire meglio il meccanismo che porta i ghiacciai «bianchi» (i normali ghiacciai che tutti conosciamo) a trasformarsi in ghiacciai «neri» (la cui superficie è ricoperta di uno strato di detriti che nasconde il ghiaccio sottostante, trasformandoli in colate di pietrame, come il ghiacciaio del Miage sul Monte Bianco). «Si tratta di un fenomeno importante perché lo strato di pietrame riduce la fusione del ghiaccio sottostante e allunga il tempo di sopravvivenza dei ghiacciai», precisa Smiraglia. «Inoltre, stu-

UNA SFIDA ECOCOMPATIBILE

Sostenibilità e gestione ambientale non sono solo una «moda verde» degli ultimi tempi, una parola con cui riempirsi la bocca per fare bella figura in società. Sono concetti che è possibile declinare nella realtà, in modo concreto, per prevenire i danni provocati dall'ingombrante presenza dell'uomo e delle sue attività, anziché curarli a posteriori.

In quest'ottica, una spedizione alpinistica e scientifica che per quattro mesi muoverà qualche centinaio di persone (quasi 100 fra alpinisti e scienziati dall'Italia, ma bisogna contare le decine e decine di portatori e guide balti) fra Karakorum e Himalaya, deve essere assolutamente attenta e rispettosa degli ecosistemi che incontrerà. Così (ed è la prima volta che accade) la spedizione «K2 2004 – 50 anni dopo» si è dotata di un sistema di gestione ambientale per sorvegliare la sostenibilità dell'intero ciclo di vita della spedizione (progettazione, allestimento, svolgimento e conclusione).

«Coerentemente con lo standard ISO14001, verrà analizzata la scelta dell'equipaggiamento e dei materiali, aggiungendo ai criteri imprescindibili legati all'idoneità d'uso anche quelli dell'ecocompatibilità nelle varie fasi del ciclo di vita dei prodotti, in particolare quelle dell'uso e dello smaltimento», spiega Riccardo Beltramo, del Dipartimento di scienze merceologiche dell'Università di Torino. «Inoltre "passeremo al microscopio" tutte le attività che verranno svolte sia dalle équipe scientifiche sia da quelle tecniche, per indicare i comportamenti migliori allo scopo di minimizzare l'impatto ambientale. Si tratta essenzialmente della gestione dei rifiuti (di ogni categoria), dei liquami organici e delle emissioni in atmosfera».

In più, diversamente da quanto troppo spesso è accaduto in passato, ogni volta che verranno smantellati i vari campi, tutti (alpinisti e scienziati) dovranno cooperare per rimuovere ogni traccia del proprio passaggio e della propria permanenza.

«Faremo un percorso che è fisico, ma anche culturale», conclude Beltramo, «nella convinzione di lasciare un'eredità positiva presso i balti e il Governo del Pakistan e indicazioni utili e praticabili su come si possano condurre spedizioni alpinistiche anche molto complesse in buona armonia con l'ambiente».

Al rientro in Italia verrà preparato un rapporto che elencherà le buone pratiche da seguire e che verrà messo a disposizione dell'Unione internazionale delle associazioni alpinistiche (UIAA) per servire da base a un protocollo adottato dai ministeri del turismo dell'Himalaya.

ufficio stampa «K2-2004, 50 anni dopo»

PRELIEVI DI NEVE (*nella pagina a fronte*) e misure geodetiche (qui sopra, il georadar per misurare l'altezza del K2) sono solo alcune delle metodologie di ricerca che verranno applicate nel corso del grande progetto alpinistico-scientifico organizzato per celebrare il cinquantenario della conquista italiana del K2. Alla spedizione parteciperanno un centinaio tra ricercatori e alpinisti.

LA MONTAGNA «ITALIANA»

Il nome K2, ovvero Karakorum-2, è una sigla che risale al 1856, assegnata dal Servizio trigonometrico britannico dell'India alla vetta, quasi una perfetta piramide, che si ergeva in fondo al Baltoro, e che gli abitanti della valle ai piedi del versante pakistano chiamano invece Chogori (letteralmente, «Grande Montagna»).

Il primo contatto fra gli italiani e il K2 avvenne nel 1890, quando l'alpinista valdostano Roberto Lerco si spinse fino alle pendici del K2. Sette anni dopo, nel maggio del 1909, giunge al Karakorum la spedizione diretta da Luigi Amedeo di Savoia, duca degli Abruzzi, che per un mese assedia la parete meridionale del K2, alta 3600 metri. I suoi alpinisti più esperti individuano la via di salita più favorevole, lo sperone sud-est, noto in seguito come Sperone Abruzzi, ma non riescono a superarlo, chiusi da un camino di roccia e ghiaccio che a 6650 metri blocca la via. Grazie alla presenza di un gruppo di scienziati vengono esplorati numerosi ghiacciai e si effettua il rilievo fotogrammetrico del bacino del Baltoro, con la determinazione di molte quote e un'abbondante documentazione fotografica. La relazione scientifica di quella spedizione è tuttora considerata il miglior testo mai scritto sull'Himalaya.

Nel 1913 una nuova spedizione compie una serie di ricerche e osservazioni geofisiche, nonché l'esplorazione e il rilevamento topografico di regioni ancora inesplorate. Nel 1929, parte la spedizione geografica di Aimone di Savoia, duca di Spoleto e nipote del duca degli Abruzzi, sotto l'egida della Società geografica italiana e del Club alpino italiano, a cui partecipa anche un giovane geologo di nome Ardito Desio.

I tentativi riprendono nel 1938 con una spedizione americana guidata da Charles Houston: un suo alpinista apre la via dello Sperone Abruzzi e arriva a quota 7750. Scende a bivaccare a un campo più basso, ma il gruppo ha finito i fiammiferi, indispensabili per scaldarsi e per bere, e la missione fallisce. Anche il tedesco-americano Fritz Wiessner, che ci riprova l'anno dopo, è costretto ad abbandonare per un «problema tecnico». Arrivati a 8370 metri (e senza ossigeno!) il suo portatore perde i ramponi di entrambi. Nel 1953, la seconda spedizione Houston desiste per una terribile bufera di neve.

Arriva l'estate del 1954. Ardito Desio ha organizzato una spedizione in grande stile: 18 uomini tra alpinisti e scienziati, più un cineoperatore (*nella foto, i componenti della spedizione*), 100 milioni di lire il preventivo di spesa, 17 tonnellate di materiale, oltre 700 portatori coinvolti per allestire il campo base. Desio allestisce il campo base a 4600 metri e il 25 maggio inizia la scalata. In un mese vengono allestiti sei campi intermedi, ma il 21 giugno il maltempo stronca Mario Puchoz, preziosa guida valdostana. Il morale è a terra. Il tempo, inoltre, è pessimo. Il Karakorum vive l'estate più fredda da vent'anni; su 70 giorni di permanenza al Baltoro, 40 sono di maltempo. Piazzati gli altri campi in quota, il 28 luglio il campo VIII viene sistemato a 7740 metri. Il 29 Compagnoni e Lacedelli sistemano come possono il campo IX a quota 8080 e ridiscendono, per risalirvi l'indomani.

A.Costa/Museo Nazionale della Montagna di Torino

Nel pomeriggio del 30, Bonatti e il portatore Mahdi salgono al campo IX per portare le bombole d'ossigeno indispensabili per l'attacco finale. È molto tardi quando giungono in vista della tendina. Lacedelli urla di lasciare le bombole e tornare giù, ma fa buio e Bonatti decide di non rischiare: scava come può un riparo nel ghiaccio e lui e Mahdi (sull'orlo di un tracollo nervoso) passano una notte a ottomila metri senza sacco a pelo. Il giorno dopo Lacedelli e Compagnoni, con 19 chili di bombole sulle spalle, arrivano in vetta.

«Durante gli ultimi metri il nostro cervello per la stanchezza e la carenza d'ossigeno era offuscato: avevo delle allucinazioni, per parecchio tempo ebbi la sensazione che una donna ci seguisse, chiesi anche a Lacedelli quale era il mio nome», ricorda Achille Compagnoni. Le dita della mano sinistra mostrano i segni del principio di congelamento subito in vetta, ma ha lo stesso viso aperto, bonario e abbronzato di un tempo. «Raggiunta la cima cominciai a ragionare più lucidamente, forse per l'euforia, la gioia di avercela fatta. Scattai delle foto e girai un filmino. Mi ero quasi dimenticato che dovevamo scendere, fu Lacedelli a richiamarmi. Ho tutt'oggi nostalgia di quella montagna e sul K2 ho lasciato una parte di me. Desio era severo e puntigliosissimo con tutti noi, ma aveva saputo creare un gruppo affiatato e solidale. Accanto all'abilità alpinistica, molte difficoltà furono superate grazie al nostro spirito di corpo. Certo, abbiamo avuto momenti di scoramento e di difficoltà, ma non abbiamo mai mollato.»

I verbali ufficiali della spedizione raccontano che i nomi dei due scalatori destinati all'assalto finale sarebbero stati decisi solo all'ultimo, valutandoli in base alle condizioni di salute e alla freschezza atletica. La conquista della vetta doveva essere un lavoro di squadra dove tutti avrebbero collaborato e tutti avrebbero avuto lo stesso merito, anche quelli che non si sarebbero mossi dal campo base. Era stato quindi deciso di tenere segreto il nome di chi avrebbe effettivamente conquistato il K2. «Ma in Pakistan alcuni giornalisti stranieri avevano messo in giro la voce che noi italiani avevamo bluffato. Così facemmo vedere le foto (*qui a fianco*) della vetta: il mio viso era stato mascherato – spiega Compagnoni – ma non la bandierina italiana con la scritta "Comune di Valfurva", dove sono nato. Inoltre, molte altre informazioni erano state comprate per pochi dollari dai portatori al nostro seguito e i resoconti iniziarono a riportare solo il nome mio e quello di Lacedelli, facendoli prevalere in modo arbitrario su quelli degli altri membri della spedizione. Ancora una volta ci tengo a ribadire che tutti hanno dato quello che potevano dare. In quel momento è toccato a me e a Lacedelli arrivare in cima, ma da soli, senza il lavoro di tutti gli altri, che si sono spesi nell'attrezzare la via e rifornire i campi intermedi, non ce l'avremmo mai fatta.»

Tutta l'avventura italiana nel Karakorum fu circondata di polemiche. Durante la selezione degli alpinisti fece scalpore l'esclusione di due «grandi» come Cassin e Ghiglione. Desio venne costantemente accusato di pensare solo al proprio prestigio. La notte al gelo di Bonatti, inizialmente non riportata nei verbali della spedizione (gestiti esclusivamente da Desio: a tutti gli altri era stato vietato, per tre anni, di divulgare ogni tipo di notizia), suscitò mille litigi e una manciata di processi; solo pochi anni or sono il CAI ha rivisto la storia ufficiale. Anche sui finanziamenti, sui diritti del film *Italia K2*, sulle medaglie assegnate, sul materiale non restituito le scaramucce sono state placate dalla carta bollata. Ma questo nulla toglie al valore dell'impresa alpinistica degli italiani.

Dopo il successo del 1954, per oltre vent'anni nessun altro alpinista raggiunse la vetta del K2. Solo nel 1977 (8-9 agosto) la spedizione giapponese diretta da Ichiro Yoshizawa porta a termine la seconda ascensione al K2 lungo lo Sperone Abruzzi. L'anno seguente la spedizione americana capeggiata da Jim Whittaker compie la terza ascensione, mentre nel 1979 è la volta della spedizione internazionale guidata da Reinhold Messner, che arriva in vetta il 12 luglio.

L. Lacedelli/ Museo Nazionale della Montagna di Torino

Giuseppe Pompili

LA «PIRAMIDE» FU INAUGURATA NEL 1990 DA ARDITO DESIO. Situata a 5050 metri di quota ai piedi dell'Everest, è una struttura di vetro e alluminio divisa in tre piani, e può ospitare, oltre ai laboratori di ricerca, fino a 25 persone.

Giuseppe Pompili

diando i ghiacciai del Karakorum, approfondiremo la nostra conoscenza sui cosiddetti ghiacciai "galoppanti": ghiacciai che accelerano bruscamente la loro velocità (che normalmente è compresa nell'ordine di qualche decina di metri all'anno), arrivando a compiere anche numerosi chilometri in un mese. Questi fenomeni, che sulle Alpi sono casi rari ed eccezionali, sono invece molto diffusi sulle grandi catene montuose asiatiche.»

Con i suoi 60 chilometri di lunghezza, il Baltoro è uno dei più lunghi ghiacciai «neri» della Terra. Qui gli scienziati italiani effettueranno, per la prima volta in altissima quota, rilievi con metodologie innovative come la scansione laser (per ottenere la ricostruzione tridimensionale della superficie glaciale), il georadar (per misurare lo spessore, che si stima raggiunga un massimo di 900 metri) e strumenti satellitari di estrema precisione (per determinare la velocità del ghiacciaio). Un gruppo di ricercatori opererà anche sul versante nord dell'Everest per raccogliere dati sulle caratteristiche chimiche e fisiche della neve e individuare la presenza di inquinanti chimici e radiochimici di origine antropica (come le scorie radioattive prodotte nel corso di test nucleari e di incidenti come quello di Chernobyl). A questo scopo i laboratori di Frascati dell'Istituto nazionale di fisica nucleare hanno realizzato speciali rivelatori per misure di radioattività *in situ* (già sperimentati con successo nel 2000, a 6400 metri di quota) che andranno a misurare le tracce delle attività nucleari umane, ma anche gli isotopi radioattivi naturali, di origine geologica o cosmica. Lo strumento realizzato dai ricercatori dell'INFN potrebbe consentire, inoltre, di effettuare le prime misure di radioattività sulla cima dell'Everest.

Nell'ambito della fisiologia e della medicina, una parte dell'impegno sarà nel solco dei «tradizionali» studi sul comportamento dell'organismo in alta quota, con un monitoraggio continuo dei parametri cardiorespiratori e dell'ossigenazione di alpinisti a quote superiori a 5000 metri. Per osservarli nelle migliori condizioni, l'équipe di Annalisa Cogo, dell'Università di Ferrara, utilizzerà uno speciale corpetto del peso di circa 200 grammi su cui sono installati sensori di rilevazione di parametri respiratori, cardiaci, di saturazione di ossigeno, di posizione corporea. Studiare le reazioni dell'organismo alla carenza di ossigeno è utile sia per lo studio di malattie cardiorespiratorie che dell'invecchiamento. Inoltre sarà condotto uno studio comparato per capire quali «segreti» racchiuda l'organismo degli abitanti della regione, che sembrano essere stati selezionati nei secoli per la loro capacità di vivere normalmente anche in carenza di ossigeno.

Quindi sarà condotto uno studio proteomico del muscolo dei tibetani. L'analisi comparata delle proteine espresse nei muscoli di tibetani nati e residenti in alta quota con quelle dei tibetani nati a bassa quota e di un gruppo di controllo nepalese-indiano ha messo in evidenza che i muscoli delle popolazioni locali hanno concentrazioni elevate di una particolare proteina dotata di grandi capacità antiossidanti. Finalità: studiare nuove metodiche di prevenzione dei danni da radicali liberi e ipotizzare possibili interventi di ingegneria molecolare finalizzati al contenimento e al rallentamento dei processi di invecchiamento dell'uomo a livello del mare.

I materiali organici che emettono luce permettono di costruire display più luminosi ed efficienti dei LED. E che possono persino essere arrotolati e srotolati...

Eastman Kodak Company

Il prototipo di schermo video flessibile della Universal Display Corporation (*nella pagina a fronte*) dà un significato inedito all'espressione «immagine in movimento». L'immagine piccola nella pagina a fronte mostra il primo schermo OLED a matrice attiva immesso sul mercato per la fotocamera digitale Kodak EasyShare LS633. In questa pagina, una visione futuribile, creata da Kenn Brown e Chris Wren della Mondolithic Studios, di un computer portatile dotato di schermo flessibile.

Universal Display Corporation (*a sinistra*); New Line/ cortesia Everett Collection (*a destra*)

Il brillante futuro delle pellicole flessibili

di Webster E. Howard

Prima dell'avvento dei videoregistratori a cassetta, era in voga l'accoppiata proiettore-schermo avvolgibile. Forse qualcuno ricorderà l'insegnante di scienze intento a srotolare uno schermo per mostrare un documentario, o il babbo indaffarato a stendere un grande foglio bianco su una parete del salotto, per far vedere agli ospiti le immagini più o meno avvincenti immagini del «filmino» delle vacanze. Ed era, purtroppo, tutt'altro che inconsueto che, a metà del film, la lampada del proiettore si bruciasse. A quell'epoca, però, c'era almeno un vantaggio: lo schermo era leggero, sottile come un foglio di carta, poteva essere avvolto e trasportato con facilità. Confrontandolo con gli schermi televisivi o i monitor dei computer, voluminosi e avidi di watt, non si può fare a meno di provare un po' di nostalgia.

Ma ora è finalmente possibile coniugare la praticità di ieri con la tecnologia di oggi: grazie a materiali organici che emettono luce, e che promettono di rendere i display digitali più convenienti e diffusi. Utilizzati nella realizzazione di schermi, i materiali organici sono più luminosi, consumano meno energia e sono di più agevole impiego industriale (e quindi potenzialmente più economici) delle attuali opzioni basate sui cristalli liquidi. Poiché i diodi organici a emissione di luce (OLED, *organic light-emitting diode*) emettono luce propria, il loro consumo energetico è significativamente inferiore a quello dei comuni schermi a cristalli liquidi (LCD, *liquid-crystal display*), che richiedono sempre una retroilluminazione. Ma gli OLED offrono molti altri entusiasmanti vantaggi: dato che non devono necessariamente essere cristallini (cioè costituiti da un ordinamento di piani di atomi che si ripete con precisione), sono più facili da produrre; sono applicati in strati sottili, e quindi hanno meno spessore; infine, forniscono immagini ad alta risoluzione grazie al fatto che materiali differenti (con diversi colori) possono essere disposti su un dato substrato. E le strutture di supporto possono essere costruite con materiali poco costosi, come vetro, plastica flessibile o fogli metallici.

Tra qualche anno, potremmo avere schermi di televisori e di computer, anche di grandi dimensioni, che si arrotolano e si mettono via velocemente e occupando poco spazio. In caso di conflitto, i militari sul campo potrebbero disporre di fogli di plastica flessibili con una mappa in tempo reale della situazione bellica. Display più piccoli potrebbero essere avvolti attorno al polso o al braccio, oppure incorporati nel vestiario. Integrati negli impianti di illuminazione domestici, i pannelli potrebbero fasciare una colonna portante o essere applicati come una tappezzeria su un soffitto o una parete.

Attualmente, i LED durano più a lungo degli emettitori organici, e sarà molto dura battere la loro onnipresenza nelle spie luminose. Ma gli OLED stanno già dimostrando il loro potenziale per quanto riguarda i display. I loro schemi emettono oltre 100 candele per metro quadrato (circa la luminanza di uno schermo per computer portatile) e ci vogliono decine di migliaia di ore (vale a dire diversi anni di uso regolare) prima che la loro radianza originale si riduca del 50 per cento.

Sono già un centinaio le società impegnate nello sviluppo di applicazioni di questa tecnologia, concentrate in particolare sui piccoli display a bassa potenza. Tra i primi prodotti realizzati, un display non flessibile da 2,2 pollici (in diagonale) per fotocamere digitali e telefoni cellulari, presentato nel luglio 2002, e un prototipo di monitor per computer da 15 pollici, entrambi fabbricati in collaborazione da Kodak e Sanyo. Nel 2003, il mercato globale dei dispositivi a display organici è stato di circa 219 milioni di dollari, ma si prevede che possa arrivare a 3,1 miliardi di dollari nel 2009, almeno stando a quanto afferma Kimberly Allen della iSupply/Stanford Resources, una società di ricerche di mercato specializzata in display.

Dai LED agli OLED

I semiconduttori cristallini, precursori degli OLED, risalgono al 1947, quando fu sviluppato il transistor, e i LED a luce visibile furono inventati nel 1962 da Nick Holonyak, Jr. Il loro primo uso commerciale fu nella veste di minuscole sorgenti di luce rossa in calcolatrici e orologi, e poco dopo si presentarono come indicatori luminosi rossi, verdi o gialli.

Negli anni novanta, con l'avvento del LED blu, i maxischermi televisivi a colori costituiti di centinaia di migliaia di chip LED hanno fatto la loro spettacolare comparsa sui grattacieli e negli stadi. Tuttavia le dimensioni più piccole usate nei PDA (gli assistenti digitali personali) e nei computer portatili si sono dimostrate meno pratiche. Non si dimentichi inoltre che integrando la tecnologia laser nei LED si è aperta la strada alla rivoluzione delle fibre ottiche e alla memorizzazione ottica di dati su CD e DVD.

LED e OLED sono costituiti da strati di semiconduttori, le cui prestazioni elettriche sono a metà strada tra quelle di un conduttore eccellente come il rame e quelle di un isolante come la gomma.

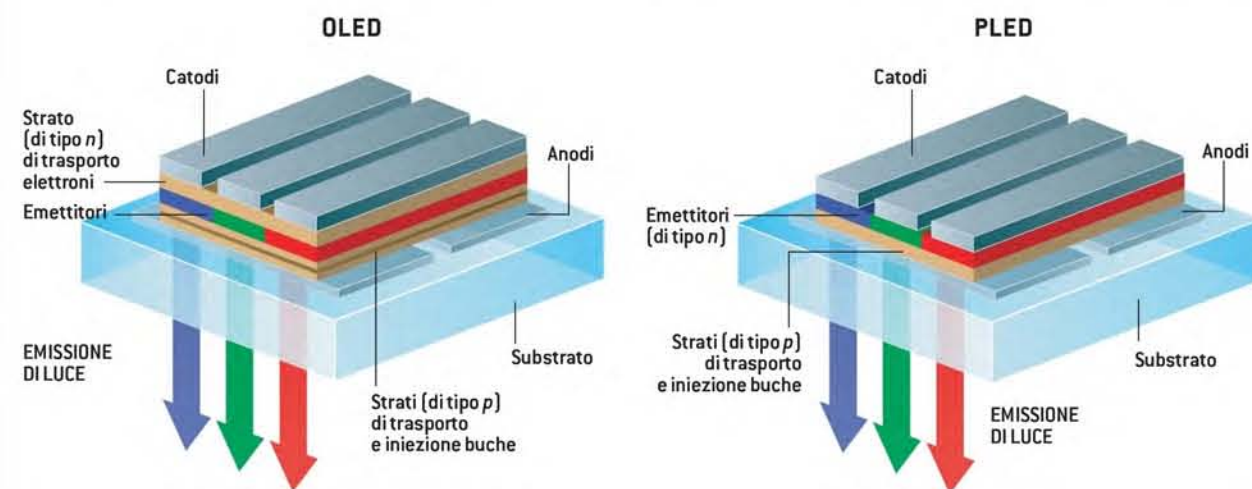
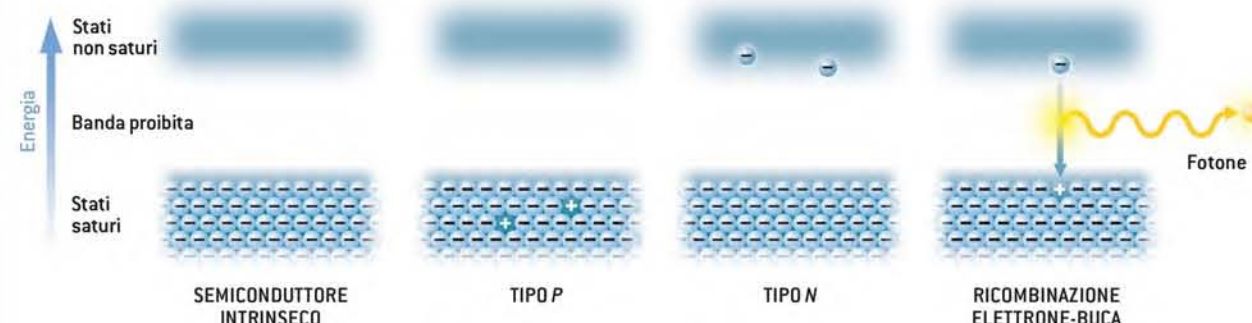
Materiali semiconduttori come il silicio hanno una piccola banda energetica proibita che separa gli elettroni stabilmente legati al nucleo atomico e quelli liberi di allontanarsene e, pertanto, di condurre elettricità. Se si applica una tensione al semiconduttore, gli elettroni possono acquistare una certa energia, che permette loro di «saltare» la banda proibita e iniziare a muoversi, generando una corrente elettrica.

Un semiconduttore può essere reso conduttivo per drogaggio, ovvero aggiungendo atomi di un'altra specie: se gli atomi aggiunti a uno strato hanno un numero di elettroni più basso di quello degli atomi che vanno a sostituire, gli

IN SINTESI

- Il familiare LED è comune nei dispositivi più svariati, da calcolatrici e orologi da polso ai maxischermi che campeggiano negli stadi. E tuttavia, dato che la sua tecnologia è troppo costosa e la fabbricazione difficile, non è molto pratico per i piccoli schermi ad alta risoluzione usati nei computer portatili, nei PDA, nelle fotocamere digitali e nei televisori.
- Gli OLED, invece, dove «O» sta per «organici», sono più facili da produrre dei LED, hanno una maggiore efficienza dal punto di vista energetico e possono essere depositati come pellicole sottili su una varietà di substrati poco costosi, compresa la plastica flessibile e il lamierino metallico.
- Questa tecnologia è già sul mercato, installata su alcune fotocamere digitali e telefoni cellulari. Ma per il futuro si prevedono applicazioni come grandi monitor per televisori e computer che potranno essere arrotolati come i vecchi schermi da proiezione, oppure display che potranno essere portati su un teatro di operazioni belliche per seguire la situazione in tempo reale.

UNO SGUARDO ALL'INTERNO

Un sandwich di materiali emette una luminescenza colorata quando a un display OLED o PLED è applicata una tensione. Le buche (cariche positive) degli strati di tipo *p* e gli elettroni (cariche negative) degli strati di tipo *n* liberano fotoni di lunghezze d'onda specifiche incontrandosi negli strati attivi di emissione. Il colore dipende dai composti usati per gli strati.

1 Un materiale semiconduttore come il silicio ha una banda energetica proibita tra i suoi stati elettronici inferiori saturi (la banda di valenza) e i suoi stati elettronici superiori insaturi (la banda di conduzione).

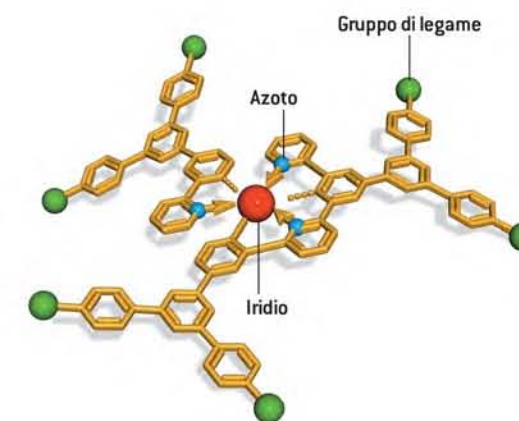
2 La rimozione di alcuni elettroni dalla banda inferiore lascia «buche» cariche positivamente, e in questo caso il materiale viene classificato di tipo *p*.

3 L'aggiunta di elettroni agli stati superiori non saturi rende il materiale di tipo *n*.

4 Quando gli elettroni ricadono nello stato inferiore e occupano le buche, vengono emessi fotoni di luce visibile.

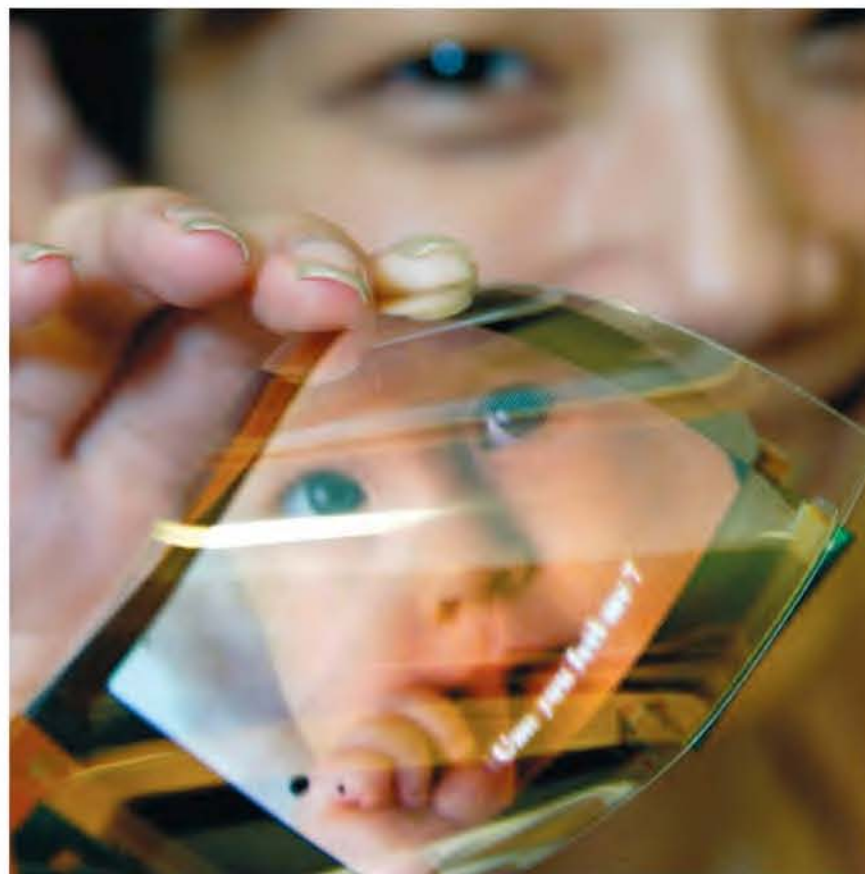
Samuel Velasco; Slim Films (dendrimero)

BLOCCHI DI COSTRUZIONE

Un dendrimero fluorescente funge da nucleo attorno a cui sono legati anelli ramificati, formando una grande sfera molecolare. L'uso di dendrimeri negli emettitori organici permette di unire i principali vantaggi degli OLED, che oggi producono display più ricchi di colore, a quelli dei PLED, che hanno un procedimento di fabbricazione più economico.

elettroni sono stati effettivamente rimossi, lasciando «buche» cariche positivamente: il materiale così alterato si dice «semiconduttore di tipo *p*». In alternativa, uno strato che sia stato drogato in modo da avere un eccesso di elettroni, carichi negativamente, diventa di «tipo *n*» (*si veda la finestra a pagina 99*).

Quando un elettrone viene aggiunto a un materiale di tipo *p*, può imbattersi in una buca e ricadere nella banda inferiore, cedendo una certa quantità di energia (pari alla banda energetica proibita) sotto forma di fotone luminoso. La lunghezza d'onda del fotone dipende dalla banda proibita del materiale emettitore.

Per poter produrre luce visibile, i materiali organici dovrebbero avere una banda proibita tra le loro bande di conduzione inferiore e superiore compresa entro una gamma relativamente ristretta di energie, più o meno tra due e tre elettronvolt. (Un elettronvolt è definito come l'energia cinetica acquistata da un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale – o tensione – di un volt. Un fotone con un elettronvolt di energia corrisponde alla radiazione infrarossa di 1240 nanometri, mentre un fotone di due elettronvolt ha una lunghezza d'onda pari alla metà della precedente: 620 nanometri, corrispondenti a un'emissione di luce di colore rossastro.)

AP Photo/Shizuo Kambayashi

LA PELLICOLA ELETTROLUMINESCENTE che questo tecnico della Pioneer sta mostrando sarà un elemento importante per realizzare un computer indossabile dalle molteplici applicazioni.

Gli emettitori organici offrono opportunità quasi illimitate per migliorare l'efficienza e ridurre i costi di produzione

Un sorprendente bagliore

I semiconduttori organici sono formati da aggregati di molecole che si presentano, nelle tecnologie attualmente allo studio, come materiali solidi ma amorfi, privi cioè di un ordine cristallino definito.

Esistono due categorie generali di emettitori di luce organici, distinte a seconda delle dimensioni delle molecole: «piccole» e «grandi». I primi LED organici tipo *p-n* di uso pratico, basati su molecole di piccole dimensioni, furono inventati nel 1987 da Ching W. Tang e Steven A. Van Slyke, della Eastman Kodak, dopo che Tang ebbe notato una sorprendente luminescenza verde che proveniva da una cella solare organica su cui stava lavorando. I due si resero conto che utilizzando due materiali organici, l'uno buon conduttore di buche e l'altro buon conduttore di elettroni, si poteva fare in modo che l'emissione di fotoni avesse luogo vicino all'area di contatto, o giunzione, dei due materiali, come nel LED cristallino. Essi avevano anche bisogno di un materiale che trattenesse i suoi elettroni saldamente, rendendo facile l'iniezione di buche. Perché la luce possa sfuggire, uno dei contatti deve essere trasparente, e i ricercatori sfruttarono la provvidenziale proprietà del materiale conduttivo trasparente più ampiamente usato, l'ossido di indio e stagno, di legare i propri elettroni in modo adeguato per un materiale di contatto di tipo *p*.

La struttura prodotta alla fine dai due ricercatori non è cambiata molto nel corso degli anni, e viene spesso chiamata «tipo Kodak», dal momento che era la Kodak a detenerne il brevetto. Partendo da un substrato di vetro, differenti materiali vengono depositati strato dopo strato. Questo processo viene eseguito facendo evaporare i materiali costituenti e lasciandoli condensare sul substrato. Lo spessore totale degli strati organici è di appena 110 nanometri, molto inferiore cioè a quello di un LED convenzionale (il cui spessore è dell'ordine dei micrometri) e meno dell'uno per cento dello spessore di un capello umano. Dal momento che le molecole dei materiali usati sono relativamente leggere (anche più leggere di una piccola proteina), gli OLED di tipo Kodak sono anche indicati come OLED a «molecola piccola».

Dopo queste intuizioni iniziali, Tang e Van Skyle continuarono a lavorare sul progetto per aumentarne l'efficienza. Aggiunsero una piccola quantità di colorante fluorescente, la cumarina, al materiale emettitore. L'energia liberata dalla ricombinazione di buche ed elettroni era trasferita al colorante, che emetteva luce con efficienza notevolmente superiore. La deposizione di strati ulteriori di ossido di indio e stagno e altri composti in prossimità degli elettrodi alterava l'interazione degli strati più spessi e migliorava l'efficienza dell'iniezione di buche ed elettroni, facendo pertanto aumentare l'efficienza di emissione complessiva dell'OLED fluorescente.

I LED organici a molecola piccola vengono usati per produrre luce rossa, verde e blu, e la luce verde ha la massima efficienza. Gli OLED che emettono nel verde possono mostrare efficienze luminose di 10-15 candele per ampere, circa come i migliori LED attuali, e di 7-10 lumen per watt, valori confrontabili con quelli delle comuni lampade a incandescenza.

LED polimerici

Il secondo tipo di emettitore organico di luce è il cosiddetto polimero emettitore di luce a «molecola grande», anche noto come diodo polimerico a emissione di luce (PLED, *polymer light-emitting diode*). Inventato nel 1990 da Jeremy Burroughes e colleghi dell'Università di Cambridge, il dispositivo è costituito da strati formati da polimeri, ossia catene di molecole organiche più piccole. I LED polimerici si ottengono con la tecnica dello *spin coating* (rivestimento mediante centrifugazione). La tecnica consiste nell'applicare uno strato sottile di polimero a un substrato piatto che poi viene fatto ruotare ad alta velocità (tra 1200 e 1500 giri al minuto) al fine di spalmare il materiale polimerico per effetto della forza centrifuga. Allo spin coating segue un passaggio che prevede la cottura per rimuovere il solvente e, in certi casi, completare la polimerizzazione.

Questo processo di formazione di pellicola è in generale più economico del procedimento di evaporazione termica descritto in precedenza. In fatto di efficienza energetica, i polimeri sono preferibili ai dispositivi a molecola piccola di tipo Kodak perché la maggiore conduttività elettronica degli strati polimerici consente di operare a tensioni inferiori.

Il PLED originale era costituito da un singolo strato attivo di un polimero chiamato polifenilene vinilene (PPV) tra contatti di metalli diversi, come ossido di indio e stagno e calcio, come in un OLED, per consentire l'iniezione sia di buche sia di elettroni. L'ossido di indio e stagno è un composto che tende a iniettare buche, mentre il calcio è un metallo che tende a iniettare elettroni.

Gli attuali PLED usano un secondo strato polimerico per l'iniezione e il trasporto delle buche. Il PPV polimerico produce luce gialla, con eccellente efficienza e un'ottima durata di vita: a livelli di luminanza di un monitor per computer, un PLED di questo tipo può funzionare per oltre 10.000 ore, ossia circa 10 anni di uso regolare. (La possibilità di generare tutti i colori è stata dimostrata, ma fino a oggi l'unico prodotto messo in commercio usa solo il giallo.) Altri polimeri e polimeri misti (vale a dire due polimeri differenti in soluzione) sono stati sviluppati, in particolare dalla Dow Chemical, sulla base della molecola organica di polifluorene. Queste configurazioni possono essere modificate per produrre un'intera gamma di colori, dal rosso al verde, variando le lunghezze dei copolimeri (che consistono di segmenti di fluorina separati da un segmento tampone). Purtroppo, le durate di vita degli schermi di questi colori non sono state paragonabili a quelle del PPV, e il blu non è ancora pronto per l'esordio sul mercato.

Superare i limiti

Per quanto gli attuali OLED e PLED fluorescenti siano discretamente efficienti, dal punto di vista energetico, vi sono ancora consistenti margini di miglioramento. Un fattore limitante dei dispositivi di prima generazione è lo spin elettronico, una proprietà quantistica intrinseca che determina in quale modo le particelle reagiscano a un campo magnetico. Quando un elettrone e una buca si incontrano, formano un'entità nota come eccitone. Le regole della meccani-

L'AUTORE

WEBSTER E. HOWARD si è laureato in fisica alla Harvard University nel 1962, e subito dopo si è dedicato alla ricerca sui semiconduttori. Dal 1974 ha lavorato su varie tecnologie di visualizzazione presso la IBM Research, la ATT/Lucent e la eMagin Corporation. I suoi sforzi più significativi hanno riguardato i transistor a film sottile e i display a cristalli liquidi. Negli ultimi anni, presso la eMagin, si è occupato dello sviluppo di microdisplay OLED, da usare in caschi e visori. Nel 2003 è stato insignito del Jan Rajchman Prize.

PER APPROFONDIRE

FORREST STEPHEN, BURROWS PAUL e THOMPSON MARK, *The Dawn of Organic Electronics*, in «IEEE Spectrum», Vol. 37, n. 8, pp. 29-34, agosto 2000.

JOHNSTONE BOB, *A Bright Future for Displays*, in «Technology Review», Vol. 14, n. 3, pp. 80-85, aprile 2001.

VAETH KATHLEEN M., *OLED-Display Technology*, in «Information Display», Vol. 19, n. 6, pp. 12-16, giugno 2003.

SHINAR JOSEPH (a cura), *Organic Light-Emitting Devices*, Springer Verlag, 2003.

UN CAMPIONARIO DI DISPLAY ORGANICI

Oltre 70 produttori sono al lavoro per sviluppare applicazioni per gli emettitori di luce organici. Ecco alcuni esempi.

Applicazione	Usi	Prodotti	Status
Piccoli display	Attrezzature elettroniche personali	Fotocamera digitale (Kodak/Sanyo) telefoni cellulari (Pioneer, RiTdisplay) componenti audio per automobile (Pioneer, TDK), rasoio elettrico (Philips)	Sul mercato
Grandi display	Televisori, computer, tabelloni, parabrezza	OLED a 15,5 pollici (Samsung, SDI), PLED a 17 pollici (Toshiba), OLED a 20 pollici (ChiMei/IBM), schermo multipannello a 24 pollici (Sony)	Prototipi: sul mercato tra due-quattro anni
Display avvolgibili	Vestiario, dispositivi portatili	Computer indossabile (Pioneer), schermo avvolgibile (Universal Display Corporation)	Prototipi: sul mercato tra diversi anni
Illuminazione generale	Rivestimenti per pareti e soffitti; luci di sicurezza per veicoli o vestiario	Nessuno ancora definito	In fase di sviluppo: sul mercato tra 5-10 anni

A cura di Chris Jozefowicz

ca quantistica per l'interazione degli spin di elettrone e buca stabiliscono che per la maggior parte dei materiali soltanto uno dei quattro eccitoni formati sarà in grado di irraggiare la propria energia sotto forma di fotone, mentre gli altri la disperderanno sotto forma di calore.

Questo problema è stato superato nel 1998 da un gruppo di ricerca guidato da Stephen R. Forrest della Princeton University e da Mark E. Thompson della University of Southern California. Essi hanno sviluppato dispositivi OLED nei quali il materiale emettitore conteneva un metallo pesante come il platino o l'iridio. In un atomo di metallo pesante gli elettroni esterni sono, in media, lontani dal nucleo, e di conseguenza hanno un grande momento angolare di rotazione. Questo momento interagisce con lo spin degli altri elettroni, creando essenzialmente condizioni in cui tutti gli eccitoni possono emettere luce anziché calore, facendo arrivare l'efficienza teorica vicina al 100 per cento. Questi nuovi emettitori vengono chiamati OLED fosforescenti, per distinguerli dai più comuni OLED fluorescenti.

Gli OLED fosforescenti a molecola piccola forniscono impressionanti guadagni di efficienza senza una significativa perdita di durata, tranne che nel caso degli emettitori blu. Purtroppo non disponiamo ancora di un buon materiale fosforescente che emetta nel blu, per quanto siano in corso ingenti sforzi presso numerosi laboratori per porre rimedio a questa situazione.

Esiste un modo per accoppiare i molti colori prodotti dagli OLED a molecola piccola con i benefici economici dello spin coating usato nei PLED? Un recente ed entusiasmante sviluppo di queste tecnologie utilizza con successo questi materiali fosforescenti proprio per ottenere quel risultato. Ricercatori dell'Università di Oxford, dell'Università di St. Andrews e della OpSys di Oxford, in Gran Bretagna, hanno sintetizzato molecole – conosciute come dendrimeri – che potrebbero essere in grado di combinare gli aspetti desiderabili delle molecole piccole e dei polimeri.

In un dendrimero, una molecola fosforescente funge da nucleo attorno al quale si depositano strati di strutture ad anello ramificate che formano una grande sfera molecolare (*si veda la finestra a p. 99*). Se gli elementi ramificati vengono scelti in modo appropriato, queste molecole possono essere dissolte, e si possono formare pellicole per spin coating e cottura, come si fa con i materiali polimerici. Alcuni dispositivi a base di dendrimeri hanno già dimostrato efficienze luminose molto alte (dell'ordine di oltre 50 candele per ampere e 40 lumen per watt).

Gli emettitori di luce organici raggiungono la stessa qualità di immagine dei voluminosi tubi a raggi catodici (CRT) e degli LCD, per quanto i processi di fabbricazione siano del tutto differenti. Per ottenere una buona qualità dell'immagine percepita da chi guarda, i gruppi di pixel che producono il rosso, il verde e il blu, chiamati triadi, devono avere una densità superiore a 100 pixel per pollice (ovvero circa 40 per centimetro), in modo che l'occhio possa fondere i colori senza notare la struttura dell'immagine sottostante.

Sia i CRT sia gli LCD raggiungono questo livello di qualità grazie alla fotolitografia, una tecnica in cui un'immagine luminosa proiettata incide su un apposito materiale una traccia della struttura progettata. I fosfori o materiali destinati a filtrare il colore sono immersi in una matrice di resina fotosensibile distesa sull'intera area dello schermo. Ogni volta che la luce colpisce il materiale, la matrice viene resa insolubile, mentre il resto del materiale viene dissolto, o sviluppato. Tre applicazioni successive, una per ogni colore, completano il processo.

Invece, gli OLED a colori a molecole piccole vengono configurati facendo evaporare i materiali emettitori attraverso una maschera. La maschera viene spostata leggermente per le evaporazioni successive dei materiali che producono il rosso, il verde e il blu, e può essere manipolata con una precisione di 10 micrometri, per dimensioni di triade di 250 micrometri. Il procedimento di applicazione preferito per i PLED a colori è la stampa a getto di inchiostro, una tecnica ampiamente usata nelle stampanti a colori per computer. Versioni di alta precisione di stampanti con inchiostri polimerici possono distribuire gli emettitori polimerici del rosso, del verde e del blu con una precisione compresa tra cinque e dieci micrometri.

DISPOSITIVI ELETTRONICI INDOSSABILI potrebbero essere dotati di display OLED flessibili, come è mostrato in questo prototipo della Universal Display Corporation. A destra, uno schermo video basato su OLED della Samsung SDICompany: misura 15,5 pollici in diagonale, ma è spesso solo 1,8 millimetri.

I prodotti di oggi e di domani

Al momento, i prototipi basati su molecole piccole forniscono immagini migliori (in quanto hanno più colori) delle versioni a polimeri, ma i fautori dei PLED contano di colmare presto la distanza.

Gli OLED e i PLED a colori possono anche essere realizzati usando un emettitore di luce bianca e minuscoli filtri colore, come viene fatto con i LED. Questo, perlomeno, è stato l'approccio usato dalla eMagin Corporation (dove ha lavorato l'autore) di Hopewell Junction, New York, per offrire una risoluzione di 800 per 600 pixel in un microdisplay a colori da 0,6 pollici, costruito da una matrice attiva di microchip di silicio. Questi schermi sono usati, abbinati a ottiche di ingrandimento, in caschi per piloti, soldati e vigili del fuoco, e anche in visori per applicazioni come i giochi 3D per computer, prodotti innovativi resi possibili dalla nuova tecnologia degli emettitori organici.

I militari, e non solo loro, stanno anche studiando tecnologie per realizzare emettitori di luce organici flessibili. Gli US Army Research Laboratories hanno recentemente assegnato due milioni di dollari alla Universal Display Corporation di Ewing, nel New Jersey, per sviluppare uno schermo OLED srotolabile da un dispositivo di comunicazione delle dimensioni di una penna. La Defense Advanced Research Projects Agency ha anche sovvenzionato ricerche su schermi flessibili adatti per il teatro di operazioni militari.

Ma, a parte queste applicazioni futuribili, ci si può attendere un progresso rapido e consistente nei materiali organici di emissione e di trasporto, data la crescita costante del numero di aziende interessate e di ricercatori al lavoro in questo campo. È ormai chiaro che gli emettitori organici offrono opportunità quasi illimitate per migliorare l'efficienza energetica, allungare la vita dei prodotti e ridurre i costi di produzione.